

DOI: 10.7667/PSPC180210

重合闸与低电压穿越相配合的有源配电网故障恢复方案

王志涛¹, 武志刚¹, 高厚磊², 李倩²

(1. 国网山东省电力公司莱芜供电公司, 山东 莱芜 271100; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 分布式电源的接入给配电网的运行方式带来了较大影响, 同时也使配电网对故障恢复方案提出了更高的要求。通过对配电网重合闸和分布式电源处电压变化的分析, 考虑重合闸对 DG 低电压穿越的影响, 提出了一种重合闸与低电压穿越相配合的有源配电网的故障恢复方案。该方案预先对分布式电源划分计划孤岛区域, 并根据故障位置、孤岛区域以及分布式电源处电压变化等不同故障情况对有源配电网实施不同的供电恢复方法。最后通过 PSCAD 模型仿真验证了所提方案的可行性和有效性。

关键词: 有源配电网; 故障恢复; 计划孤岛; 分布式电源; 电压跌落

A fault recovery scheme cooperating with reclosing and LVRT for active distribution network

WANG Zhitao¹, WU Zhigang¹, GAO Houlei², LI Qian²

(1. Laiwu Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Laiwu 271100, China;
2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The integration of distributed generation brings great change to the operation mode of the distribution network, and higher requirements have also been set for the fault recovery scheme. By analyzing the relationship between fault reclosing and voltage variation of the distributed generation in distribution network and considering the influence of reclosing on LVRT of DG, this paper proposes a new fault recovery scheme cooperating with reclosing and Low Voltage Ride Through (LVRT) for active distribution network. The planned isolated island area is divided in advance for each DG, and different fault recovery methods are implemented according to the different fault conditions of the fault location, the isolated island area and the voltage variation of the distributed generation. The feasibility and effectiveness of the proposed scheme are verified by simulation in PSCAD.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377100) and Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (No. 52061216000M).

Key words: active distribution network; fault recovery; pre-planned islanding; DG; voltage drop

0 引言

供电恢复是有源配电网故障处理的重要组成部分, 也是实现配电网自愈的重要条件^[1]。在分布式电源大量接入的背景下, 配电网对供电恢复提出了更高的要求^[2-3]。

目前国内外对于有源配电网的故障恢复开展了相关研究, 并提出了一些方案。文献[4]提出了一种将防孤岛保护、低电压穿越与分布式馈线保护相结合的有源配电网分布式保护方案, 但该方案没有考

虑重合闸失败导致 DG 退出运行对配电网产生的影响。文献[5]提出了光伏电站 LVRT 与前加速自动重合闸的配合方案, 该方案通过整定重合闸时间, 有效避免了因 DG 向短路点提供故障电流而导致的重合闸失败。但该方法认为故障后光伏电站必定退出运行, 无法发挥 DG 的接入在配网故障时给予的系统电压支撑的积极作用, 而且重合闸时间过长, 影响故障恢复的速度。文献[6]预先将有源配电网划分为若干个能孤岛运行的区域, 故障隔离后设计了重合闸和孤岛再并网控制方案, 但未具体分析故障恢复方案, 也没有考虑重合闸对 DG 低电压穿越的影响。文献[7]提出了通过一种新的网络拓扑识别的方式实现的分布式馈线自动化保护方案。文献[8-9]均

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51377100); 国网山东省电力公司科技项目资助(52061216000M)

提出了一种结合配电网重构和孤岛划分的故障恢复策略,但其重构方法一般是考虑限定的条件,实用性受到限制。文献[10]考虑了分布式电源运行特性,提出一种适合多 DG 接入的配电网保护方案,但其故障算法的实现依靠 PMU 在线计算,需要传输大量实时信息,因此对数据通信技术要求较高。

通信技术的不断发展和配电网的不断升级改造,为提出新的故障恢复方法提供了技术条件^[11]。本文根据分布式电源的容量预先对 DG 划分计划孤岛区域,当故障发生并隔离后,分布式电源公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)处的智能终端单元(Smart Terminal Unit, STU)检测该DG 是否仍存在完整的计划孤岛区域以及故障电压首次降低的程度,并根据不同情况选择不同的供电恢复方案,实现了有源配电网的快速供电恢复。最后用 PSCAD 模型仿真验证了所提方案的可行性。

1 重合闸对分布式电源低电压穿越的影响

1.1 低电压穿越

在分布式电源接入配电网早期,为了消除 DG 对配电网保护带来的不利影响,控制装置在故障发生时主动将所有 DG 退出运行,使配网恢复原有的无源辐射状网络,以使原有的保护能够正常动作。但随着 DG 渗透率的提高,全部切除 DG 不仅不能发挥 DG 在故障时的电压支撑作用,而且有可能进一步加剧电网的功率失衡,影响电网的稳定运行^[12-18]。因此,考虑到有源配电网的安全性和稳定性,电网要求在故障发生后,若 PCC 处的电压跌落在一定的范围内,即满足低电压穿越的条件,则保持 DG 并网运行一段时间并继续提供无功支持^[19-20]。低电压穿越条件要求如图 1 所示,一般地,对于光伏电站或风电场, T_1 取 0.625 s, T_2 取 2 s^[21-22]。

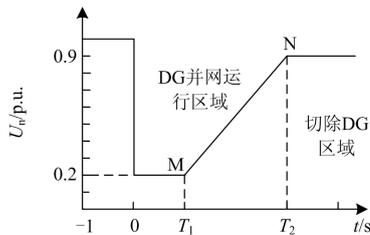


图 1 低电压穿越条件要求

Fig. 1 Requirements for LVVRT conditions

如图 1 所示,若分布式电源 PCC 处电压保持在实线以上,则保持 DG 并网运行,一旦 PCC 处电压跌落到实线以下,则保护将切除 DG,退出运行。

对于有源配电网的故障恢复,目前的相关研究

方案侧重于网络重构算法的优化,而很少考虑重合闸对分布式电源低电压穿越的影响。当故障发生区域确定后,相应开关跳闸以隔离故障,一段时间后近电源侧开关进行重合闸操作。一般来讲,在重合闸期间,某些分布式电源也正处于低电压穿越过程中。若重合闸于永久性故障,某些分布式电源 PCC 处的电压二次骤降,跌落至图 1 所示的低电压穿越要求曲线以下,这些分布式电源就会退出运行,对配电网的稳定运行造成很大的影响。需要说明的是,并非所有分布式电源的低电压穿越过程都会受到重合闸操作的影响,故障发生位置的不同对于分布式电源低电压穿越的影响不同,下文将介绍不同故障区段下重合闸对 DG 的影响。

1.2 不同故障区段下重合闸对 DG 的影响

1.2.1 故障发生在分布式电源所连接馈线

本文分析的前提是有源配电网中所有馈线开关均为断路器,每一个开关处均装有 STU,STU 之间通过以太网无源光网络(Ethernet Passive Optical Network, EPON)接入网技术实现对等通信,且 STU 自身可完成信息的处理与控制决策。如图 2 所示,正常运行状态下,联络开关 KLL 处于分闸状态,其他馈线上的断路器均处于合闸状态。当 F2 处发生故障时,母线 1、2、3、4、5、6 第一次感受到电压降落,开关 K5、K6 处的 STU 检测到故障位于本区域,发“跳闸”命令使开关 K5、K6 跳开以隔离故障,大约 0.8 s 后近电源侧开关 K5 重合闸,若故障为瞬时性故障,则重合闸成功并通知开关 K6 合闸,联络开关始终保持“分闸”状态,线路恢复正常运行。若故障为永久性故障,则开关 K5 重合闸失败,母线 1、2、3、4 的电压二次下降。

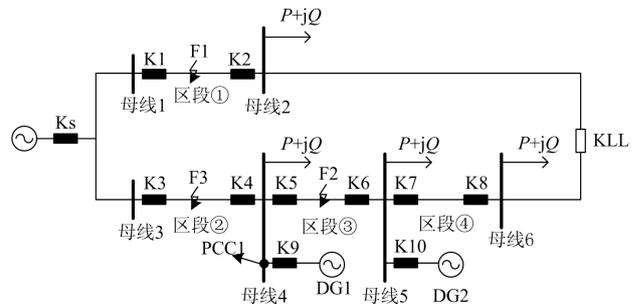


图 2 有源配电网系统结构图

Fig. 2 System structure diagram of active distribution network

对于 DG1,故障发生在其下游侧,若发生永久性故障,DG1 所连接的母线 4 发生了两次电压跌落,如果故障情况严重,有可能导致母线 4 的电压在第二次跌落时不满足 DG1 处的低电压穿越条件,进而使开关 K9 跳闸,退出 DG1 的运行。

对于 DG2, 故障发生在其上游侧, 由于远电源侧开关 K6 处于“分闸”状态, 近电源侧开关 K5 重合闸成功与否不影响 DG2 处母线的电压, 因此不会出现因重合闸失败导致 DG 退出运行的情况。

1.2.2 故障发生在分布式电源相邻馈线

如图 2 所示, 当 F1 处发生故障时, 母线 1、2、3、4、5、6 第一次感受到电压降落, 开关 K1、K2 跳闸以隔离故障, 随后近电源侧开关 K1 进行重合闸, 若故障为瞬时性故障, 则重合闸成功, 通知开关 K2 合闸, 联络开关始终保持“分闸”状态, 线路恢复正常运行; 若发生的是永久性故障, 重合失败, 开关 K1 再次跳开, 母线 1、3、4、5、6 的电压二次下降。对于 DG1 和 DG2, 故障均发生在相邻馈线, 这里只分析故障对 DG1 的影响。由于 DG1 与故障线路相邻, 因此开关 K1 重合于故障对 DG1 所连母线处的电压造成了又一次的冲击, 使电压二次骤降, 如果故障 F1 处与 DG1 之间线路距离较短或故障情况严重, 可能造成 DG1 处电压不满足低电压穿越条件而切除 DG1。

综上, 在有源配电网中, 当重合闸于永久性故障时, 故障发生区段与分布式电源之间的位置关系以及故障导致分布式电源所连母线处的电压降落的程度, 均会对分布式电源低电压穿越产生很大的影响。目前, 在有源配电网故障恢复方案的相关研究中, 很少有考虑重合闸对于分布式电源低电压穿越的影响。但重合闸有可能造成分布式电源低电压穿越失败, 从而导致 DG 退出运行, 降低 DG 发电效益。本文考虑此影响, 并结合防孤岛保护, 提出针对不同故障情况使用不同的供电恢复方案。

2 供电恢复方案

2.1 孤岛划分

对于有源配电网中的每一个分布式电源, 本文根据分布式电源和馈线负荷的容量, 为其划分多个适当的计划孤岛区域。所谓计划孤岛, 是指当故障隔离后, 若非故障区域的失电负荷没有和主电源相连, 但存在与分布式电源相连的通路, 且分布式电源具有稳定的输出能力, 此时可以考虑通过计划孤岛实现供电恢复。

以图 2 中的 DG1 为例, 可根据负荷容量划分为如图 3 虚线框所示的计划孤岛区域。已知图 3 中母线 2、4、5、6 负荷容量均为 2 MW, 分布式电源 DG1 和 DG2 的功率均为 2 MW。当 F2 发生永久性故障时, 开关 K5 和 K6 跳闸以隔离故障, 为了避免

由于开关 K5 重合闸造成 DG1 退出运行, 主动断开开关 K3 和 K4 就可使 DG1 按计划孤岛运行, DG1 为母线 4 中负荷供电。同理, 当 F1 发生永久性故障时, 当计划孤岛条件成立时, 主动断开开关 K3、K4、K5 和 K6, 使 DG1 按计划孤岛运行。

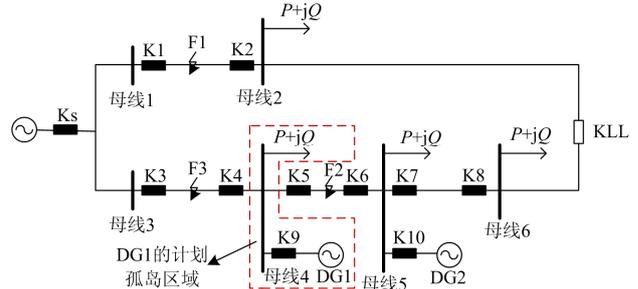


图 3 DG1 的计划孤岛区域

Fig. 3 Planned island area of DG1

2.2 电压检测

当故障发生时, 分布式电源 PCC 处电压会降低, 随着分布式电源输出无功, PCC 处电压会逐渐升高。若分布式电源与故障区段近电源侧开关之间有完整的通路, 重合闸至永久性故障将导致电压二次跌落。如图 1 所示, 取 T_1 为 0.625 s, T_2 为 2 s, 则 M 点坐标为(0.625, 0.2), N 点坐标为(2, 0.9), 直线 MN 的斜率为 0.509, 当重合闸时间为 0.8 s 时, 对应线段 MN 上的点坐标为(0.8, 0.41)。假设两次电压跌落深度相同, 考虑留有一定的裕度, 将计算所得的临界值由额定电压的 41% 改为 50%。若第一次电压跌落至额定电压的 50% 以下, 则第二次电压跌落将导致分布式电源因低电压穿越失败而退出运行; 若 PCC 处电压跌落至额定电压的 50% 以上, 则认为第二次电压跌落不会导致低电压穿越失败。

2.3 方案流程

本文根据分布式电源和负荷容量预先为每一个 DG 划分不同的计划孤岛区域, 当故障发生时, 通过线路两侧电流幅值的比较确定故障区段。如果故障区段在 DG 的下游侧或相邻馈线上, 则通过分布式电源 PCC 处的 STU 与馈线上其他 STU 之间信息交互获得的网络拓扑, 检测故障隔离后每一个 DG 是否还存在完整的计划孤岛区域。根据以上检测结果, 按以下两种情况分别设计了不同的故障恢复方案。

如果故障区段在 DG 的下游侧或相邻馈线上, 且相关 DG 的计划孤岛区域没有因馈线开关跳闸被破坏, 即仍存在完整的计划孤岛区域, 则检测 PCC 处电压变化, 如果电压首次跌落至额定电压的 50% 以下, 则主动断开相应断路器, 实现计划孤岛运行, 待联络开关闭合, 非故障失电区域恢复供电, 再进

行 DG 同期并网, 恢复整个配电网的正常运行。如果 PCC 处电压首次跌落至额定电压的 50% 以上, 则进行传统的重合闸操作。如图 3 所示, 若 F2 发生永久性故障时, 开关 K5 和 K6 跳闸以隔离故障, 由于故障区段在 DG1 的下游侧, 且计划孤岛区域完整, 若检测到 PCC1 处的电压首次跌落至额定电压的 50% 以下, 则主动断开开关 K3 和 K4, 使 DG1 按计划孤岛运行, 开关 K5 不再进行重合闸操作, 有效节省了故障恢复时间。然后将联络开关闭合, 恢复馈线供电, 再将 DG1 同期并网, 恢复有源配电网的正常运行。若 PCC 处电压首次跌落至额定电压的 50% 以上, 则通过闭合联络开关 KLL 恢复非故障失电区段④的供电。

如果故障区段在 DG 的上游侧或 DG 不存在完整的计划孤岛区域时, 按照传统的重合闸操作进行故障恢复。具体的故障恢复方案流程图如图 4 所示。

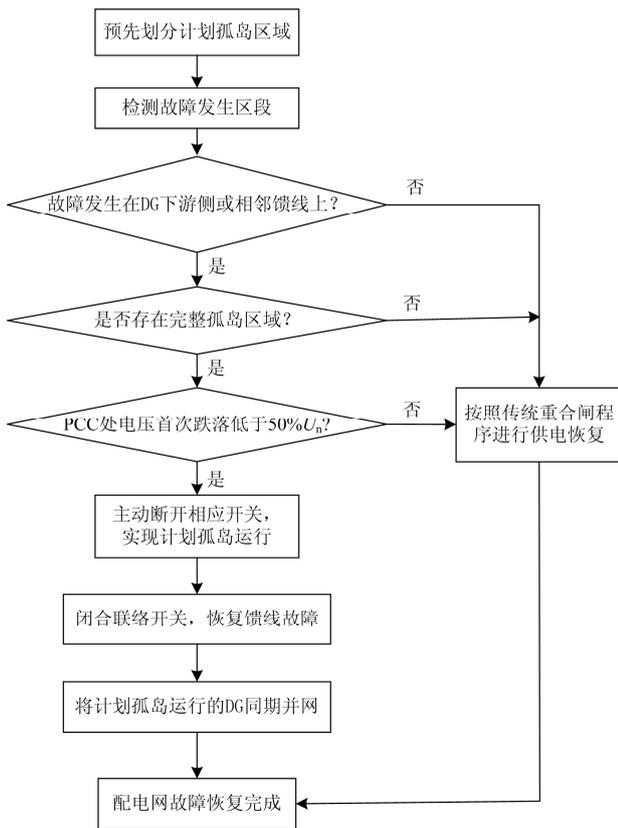


图 4 故障恢复方案的流程图

Fig. 4 Flow diagram of the fault recovery scheme

3 仿真验证

3.1 模型建立

本文在 PSCAD 软件中搭建了有源配电网系统模型^[23], 系统图如图 2 所示, 模型参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

元件	项目	参数
系统电源	电压	10 kV
	阻抗	$1\angle 80^\circ$
	类型	逆变型
DG 1,2	控制策略	PQ 控制
	功率	2 MW
Load 1,2,3,4	容量	2 MW
	功率因数	0.9

表 2 线路参数

Table 2 Line parameters

阻抗参数	正序阻抗	$(0.17+0.34j)\ \Omega$
	负序阻抗	$(0.17+0.34j)\ \Omega$
	零序阻抗	$(0.42+1.51j)\ \Omega$
线路长度	区段①, ②, ③, ④	2 km

3.2 重合闸对 DG 影响的仿真实验验证

为了验证重合闸对 DG 低电压穿越的影响, 本文分别模拟了故障发生在配电网不同位置下的短路故障以及故障恢复过程。相比较电机类 DG, 逆变类 DG 无法在故障后提供电压支撑作用, 因此其并网点电压跌落程度较大。为模拟配电网中电压跌落最严重的故障情况, 本文仿真中选择的 DG 类型为逆变类 DG, 故障类型为三相短路故障。

如图 2 所示, F1 处发生永久性故障, 故障发生在 DG1 所在馈线的相邻馈线, 图 5 中实线代表故障发生前后 PCC1 处的线电压, 虚线为低电压穿越条件。

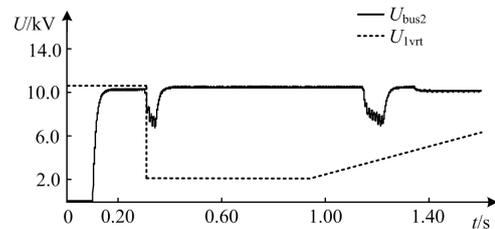


图 5 F1 永久性故障时 PCC1 处的电压变化曲线

Fig. 5 Voltage change at PCC1 when permanent fault occurs at F1

当 F2 处发生永久性故障时, 对于 DG1, 故障发生在其下游侧, 图 6 中实线代表 PCC1 处的线电压变化曲线。

当 F3 处发生永久性故障时, 对于 DG1, 故障发生在其上游侧, 图 7 中实线代表 PCC1 处的线电压变化曲线。

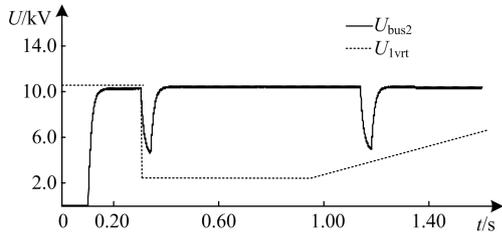


图 6 F2 永久性故障时 PCC1 处的电压变化曲线
Fig. 6 Voltage change at PCC1 when permanent fault occurs at F2

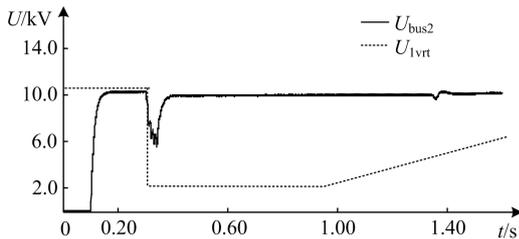


图 7 F3 永久性故障时 PCC1 处的电压变化曲线
Fig. 7 Voltage change at PCC1 when permanent fault occurs at F3

如图 5—图 7 所示, 故障发生在 0.3 s 时, 且经过 0.8 s 后进行重合闸操作。对比以上 3 个图, 可以发现当故障发生在 DG1 的上游侧时, 重合闸对于 PCC1 处的电压影响很小, 不会出现电压不满足低电压穿越条件的现象。但当故障发生在 DG1 的下游侧或相邻馈线时, 重合闸失败会使 PCC1 处的电压发生二次骤降, 可能导致不满足低电压穿越而切除 DG。因此, 当故障发生在分布式电源的下游侧或相邻馈线时, 且 PCC 处电压由于故障首次跌落至额定电压的 50% 以下, 则认为重合闸失败会导致 DG 退出运行, 所以主动断开相应断路器, 按照预先划分的计划孤岛运行, 待馈线故障恢复后, 再进行同期并网。

3.3 故障恢复方案的仿真验证

为了验证故障较为严重的情况下 DG 可能会退出运行, 本文在区段③上模拟了距 DG1 下游 100 m 处发生永久性故障的情况, 故障类型为三相短路, DG1 的 PCC 处电压变化如图 8 和图 9 所示。

如图 8 中实线所示, 在 0.3 s 时故障发生, 电压跌落至额定电压的 50% 以下, 约 1.1 s 时近电源侧开关按照传统重合闸策略进行重合闸操作, 由于是永久性故障, 重合闸失败, 电压二次下降, 不再满足低电压穿越条件要求, PCC1 处断路器 K9 跳闸, DG1 退出运行。

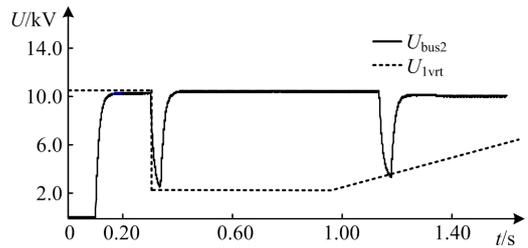


图 8 靠近 DG1 下游处故障时 PCC1 处电压变化曲线
Fig. 8 Voltage changes at PCC1 when the fault approaches DG1

以上故障情况的故障区段在 DG1 的下游侧, 对于 DG1 来说, 存在完整的计划孤岛区域, 且 DG1 的 PCC 处电压首次跌落至额定电压的 50% 以下。按照本文所提方案, 在故障隔离后, 应断开开关 K3 与 K4, 形成计划孤岛区域, 待联络开关闭合, 非故障失电区段④恢复供电, 将 DG1 重新并网运行。根据以上供电恢复策略, 得到 PCC1 处电压变化如图 9 所示。

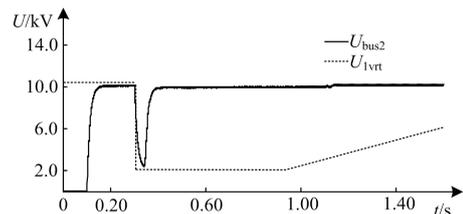


图 9 所提方案仿真中 PCC1 处电压变化曲线
Fig. 9 Voltage changes at PCC1 in the proposed scheme simulation

对比图 8 和图 9, 发现在本文所提新的故障恢复方案中, 电压不再二次降低, DG1 保持并网运行。因此, 所提故障恢复方案是有效且可行的。

4 结论

通过分析分布式电源低电压穿越条件以及重合闸对 PCC 处电压的影响, 本文提出了一种新的有源配电网故障恢复方案。该方案预先对分布式电源划分计划孤岛区域, 故障发生后, 若某 DG 的 PCC 处电压首次跌落至额定电压的 50% 以下, 且故障区段位于该 DG 的下游侧或该 DG 所连接馈线的相邻馈线上, 则使该 DG 按照计划孤岛区域运行, 避免故障恢复过程中因重合闸导致的 DG 退出运行, 提高了分布式电源的利用效率。通过在 PSCAD 软件中的仿真测试, 验证了本文所提方案的可行性。

参考文献

[1] 刘健. 现代配电自动化系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

- [2] 咸国富. 智能配电网分布式供电恢复方法[D]. 济南: 山东大学, 2017.
XIAN Guofu. Distributed power service restoration method for smart distribution grid[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [3] 郭谋发. 配电网自动化技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [4] 王健. 有源配电网分布式保护方案及装置实现[D]. 济南: 山东大学, 2016.
WANG Jian. Distributed protection scheme and device realization of active distribution network[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [5] 李育强, 王志文, 王维庆, 等. 具备 LVRT 能力的光伏接入配网对重合闸的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 61-67.
LI Yuqiang, WANG Zhiwen, WANG Weiqing, et al. Impact and countermeasures of PV access distribution network with LVRT capability on reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 61-67.
- [6] 唐志军, 邹贵彬, 高厚磊, 等. 含分布式电源的智能配电网保护控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 9-14.
TANG Zhijun, ZOU Guibin, GAO Houlei, et al. Intelligent distribution network protection and control scheme with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 9-14.
- [7] 范开俊, 徐丙垠, 董俊, 等. 基于智能终端逐级查询的馈线拓扑识别方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 180-186.
FAN Kaijun, XU Bingyin, DONG Jun, et al. Feeder topology recognition method based on intelligent terminal step by step query[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 180-186.
- [8] 周濂, 解慧力, 郑柏林, 等. 基于混合算法的配电网故障重构与孤岛运行配合[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 136-142.
ZHOU Quan, XIE Huili, ZHENG Bolin, et al. Hybrid algorithm based coordination between distribution network fault reconfiguration and islanding operation[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 136-142.
- [9] 孙洁, 王昌平, 王英男, 等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 56-62.
SUN Jie, WANG Changping, WANG Yingnan, et al. Service restoration of complex distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 56-62.
- [10] 李乃永, 梁军, 赵义术, 等. 考虑分布式电源随机性的配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 33-38.
LI Naiyong, LIANG Jun, ZHAO Yishu, et al. Protection schemes for distribution network considering the randomness of distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 33-38.
- [11] 王昌照. 含分布式电源配电网故障恢复与可靠性评估研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
WANG Changzhao. Research on service restoration and reliability evaluation of distribution network with distributed generation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [12] 夏熠. 分布式电源接入对配电网的影响及保护方法探究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
XIA Yi. The influence of the distributed generation access to distribution network and research of the protection schemes[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [13] 唐成虹, 杨志宏, 宋斌, 等. 有源配电网的智能分布式馈线自动化实现方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 101-106.
TANG Chenghong, YANG Zhihong, SONG Bin, et al. A method of intelligent distributed feeder automation for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 101-106.
- [14] 高亮, 郎陈杰, 夏能弘. 分布式电源并网条件下配电网继电保护方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 143-149.
GAO Liang, LANG Chenjie, XIA Nenghong. Design of relay protection scheme of distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 143-149.
- [15] 姚玉海, 王增平, 张首魁, 等. 基于偏好知识的多目标优化算法求解计及电源侧的配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 1-8.
YAO Yuhai, WANG Zengping, ZHANG Shoukui, et al. Multi-objective optimization algorithm based on decision preferences to solve distribution network service restoration considering power supply[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 1-8.
- [16] 齐郑, 张首魁, 李志, 等. 考虑时间尺度的含 DG 配电网故障动态恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 31-38.
QI Zheng, ZHANG Shoukui, LI Zhi, et al. Dynamic

- service restoration strategy considering time scale for distribution network with DGs[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(16): 31-38.
- [17] 方佳良, 李智, 查伟强, 等. 基于预测的含大量光伏电源主动配电网孤岛运行两阶段故障恢复策略[J]. *智慧电力*, 2018, 46(11): 47-52.
- FANG Jialiang, LI Zhi, ZHA Weiqiang, et al. Prediction based two-stage fault recovery strategy for isolated active distribution network operation with large number of photovoltaic power supplies[J]. *Smart Power*, 2018, 46(11): 47-52.
- [18] 刘加国, 王庆, 单来支, 等. 基于自适应蚁群算法的配电网故障恢复[J]. *广东电力*, 2018, 31(5): 134-139.
- LIU Jianguo, WANG Qing, SHAN Laizhi, et al. Power distribution network fault recovery based on self-adaptive ant colony algorithm[J]. *Guangdong Electric Power*, 2018, 31(5): 134-139.
- [19] 郭腾云, 刘艳. 基于博弈方法的含分布式电源配电网重构优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(7): 28-34.
- GUO Tengyun, LIU Yan. Game theory based reconfiguration optimization for distribution network with distributed generations[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(7): 28-34.
- [20] 中国电力科学研究院. 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW 480—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- China Electric Power Research Institute. Technical rule for distributed resources connected to power grid: Q/GDW 480—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [21] 中国电力科学研究院. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- China Electric Power Research Institute. Technical requirements for access of wind farms to power systems: GB/T 19963—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [22] 中国电力科学研究院. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- China Electric Power Research Institute. Technical rule for connecting PV power station to electric power systems: GB/T 19964—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [23] WANG Longchang, GAO Houlei, ZOU Guibin. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.

收稿日期: 2018-03-01; 修回日期: 2018-07-21

作者简介:

王志涛(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电力系统及自动化专业的运行与管理工作;

武志刚(1971—), 男, 研究生, 高级工程师, 主要从事电力系统及自动化专业的运行与管理工作;

高厚磊(1963—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 从事电力系统保护与控制的教学和研究工作; Email: houlei@sdu.edu.cn

(编辑 魏小丽)