

DOI: 10.7667/PSPC160926

含分布式电源的配电网保护改进方案综述

王鲍雅琼, 陈皓

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610000)

摘要: 由于分布式电源(Distributed Generation, DG)的接入, 配电网原有保护的动作特性发生了变化, 原有保护很难继续适用于含 DG 的配电网。为了保障配电网的供电可靠性, 充分发挥 DG 的潜力, 有必要对含 DG 的配网保护方案进行研究。在简略分析 DG 接入配网后对原有保护影响的基础上, 对含 DG 的配网保护改进方案进行了全面地综述研究, 并对其进行分类, 主要包括限制 DG 的准入容量、改进的自适应保护方案、基于通信技术的故障定位、孤岛检测和孤岛划分。分析了各改进保护方案的原理和特点, 说明了其优缺点, 最终指出了含 DG 的配网保护发展方向, 对含 DG 的配网保护的研究有一定参考价值。

关键词: 分布式电源; 配电网保护; 准入容量; 自适应保护; 孤岛检测; 孤岛划分

Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation

WANG Baoyaqiong, CHEN Hao

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610000, China)

Abstract: Due to the access of the distributed generations (DG), the original protection of the distribution network has been changed and can not be adaptable for the network with DG. In order to guarantee the power distribution reliability and make full use of DG, it's necessary to discuss the protection scheme of the distribution networks with DG. The influence of DG on the original protection is summed up in this paper. The improving protection methods with DG are thoroughly analyzed and classified, it can be divided into limiting the penetration capacity of DG, promoted adaptive protection, fault location based on the communication technology, islanding detection and islanding partition. The principles and characteristics of these methods are analyzed, the advantages/disadvantages are illustrated and the developing trends of distribution network protection with DG are pointed out. It can be a reference to the study of distribution network protection with DG.

Key words: distributed generation; protection of distribution network; penetration capacity; adaptive protection; islanding detection; islanding partition

0 引言

随着全球范围能源短缺和环境污染的日益加剧, 以清洁燃料做能源的分布式发电在电力工业中的应用也日渐广泛。由于 DG 在电力系统中的渗透率越来越高, 供电模式出现了从大规模集中式供电向集中式分布式相结合供电的过渡趋势。大电网与 DG 的结合供电具有能耗低、投资少、可靠性高、灵活性高等优点。然而, DG 的发电特点与传统发电有所不同, 当 DG 接入配电网时, 会使配电网从单电源放射状的简单网络变为多电源的复杂网络, 从而影响网络结构和潮流方向, 最终影响继电保护装置的选择性、灵敏性、速动性和可靠性。因此,

为了保障配电网的供电可靠性, 尽可能发挥 DG 的作用, 有必要讨论 DG 接入配电网后对原有保护的影响, 以及考虑 DG 接入的配电网保护方案。文献 [1-2] 从限制短路功率、技术改造升级和新技术应用等方面总结了配网保护的改进方案, 但未对 DG 可能出现的孤岛状态进行分析。本文分析了 DG 对原有配网保护的影响, 并在此基础上, 对含 DG 的配电网保护改进方案进行了总结, 主要包括: 限制 DG 注入容量、改进自适应保护、基于通信的故障定位、孤岛保护以及孤岛划分。

1 DG 接入配网后对原有保护的影响

图 1 所示的配电网在母线 C 处接入了一个 DG,

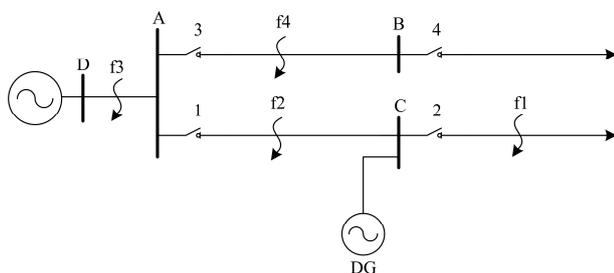


图 1 含 DG 的配电网系统

Fig. 1 Distribution system with distributed generation

为部分负荷进行供电。DG 的接入对系统的三段式电流保护、过电流保护、反时限过电流保护、距离保护、重合闸等原有保护造成了影响,同时可能造成不可控孤岛运行情况,影响供电质量和人员安全。

文献[3]分析了 DG 对三段式电流保护的影响。当 f1 点发生故障时, DG 对流过保护 2 的故障电流有助增作用,可能导致保护 2 的误动作; DG 使流过保护 1 的故障电流减小,导致保护 1 的灵敏度下降,保护范围变小,甚至发生拒动。f2 点发生故障时,电源和 DG 会对故障点提供故障电流,但流过保护的故障电流值没有变化,此时 DG 对保护无影响。当 f3 点故障时, DG 提供的反向电流会通过保护 1,若保护 1 未装设方向元件,就会发生误动。f4 点发生故障时,反向电流通过保护 1,可能发生误动;此外, DG 会对助增流过保护 3 的故障电流,可能导致保护 3 的误动。

文献[4]分析了 DG 对过电流保护配合的影响。当故障电流高于允许电流值,主保护和后备保护的动作时差会小于保护配合时间段(Coordination Time Interval, CTI),导致保护间不能配合。DG 的接入会提高故障等级, DG 与故障点间距离越小,故障电流提升值越大。

文献[5]定量分析了 DG 对反时限过电流保护的影响。f1 点故障时, DG 对下游故障电流的助增作用会缩短保护 2 的动作时限;对上游故障电流的分流作用会延长保护 1 的动作时限,导致较长的故障切除时间,当 DG 的接入容量超过一定值时,保护 1 会拒动。f2 点故障时, DG 不影响保护的動作时限。

文献[6]分析了 DG 对距离保护的影响。f1 点故障时,保护 2(保护 I 段)的测量阻抗值不变,保护不受影响;保护 1(保护 II 段)的测量阻抗变化,比真实阻抗多出一个性质不定的附加阻抗,附加阻抗在送电端多呈阻容性,因此区外故障时易误动,在受电端多呈阻感性,区内故障时保护易拒动^[7];保护 III 段能从动作时限上躲过 DG 接入的影响。此外,

当 DG 直接从线路接入时,测量阻抗发生改变,可能导致保护 I 段拒动。

值得一提的是, DG 的并网接口类型也对保护动作有影响。同步电机产生连续的短路电流;异步发电机在对称故障时会产生一个或两个周期的短路电流,在不对称故障时会造成更长时间的短路电流;而电力电子接口的 DG 基本不会产生故障电流。

文献[6-8]分析了 DG 对重合闸的影响。f2 点故障时,保护 1 断路器跳闸, DG 未与故障点断开,继续提供故障电流,导致电弧不能正常熄灭,若此时重合闸,会使故障点电弧重燃,绝缘击穿,扩大故障范围。f3 点故障时,保护 1 断路器跳闸, DG 仍与负荷相连,形成孤岛,重合闸时 DG 和配电网可能存在相位差,非同期重合闸会导致瞬时过电压,产生较大冲击电流,影响设备正常运行。此外, DG 还会影响熔断器和重合器的协同工作, DG 接入馈线后会增加流过熔断器的电流,同时一定程度上维持馈线首端电压,减小流过重合器的电流,最终降低协同工作裕量^[9]。

文献[10]分析了 DG 可能造成的不可控孤岛运行情况。f3 点故障时,保护 1 动作,形成不可控孤岛。如上文所述,不可控孤岛进行非同期重合闸会导致故障加剧。此外,若 DG 容量较大,可能出现瞬时过电压或过频率;若 DG 容量较小,可能导致谐振甚至铁磁谐振。以上原因都会影响供电质量,同时对设备和人员安全造成威胁。

2 含 DG 的保护改进方案

针对 DG 接入后对传统保护造成的恶劣影响,国内外学者从不同角度提出了含 DG 的配网保护改进方案,可以分为以下 5 个方向: 1) 考虑经济性因素,限制 DG 的接入容量,从而沿用原有保护装置和方案; 2) 加装少量设备,采用改进的自适应保护方案,以灵活地适应 DG 对保护的影响; 3) 基于通信技术,根据多点信息实现保护动作判断; 4) 针对可能出现的不可控孤岛问题,采用孤岛检测技术快速检测孤岛,以降低不可控孤岛对电网的负面影响; 5) 在紧急情况进行孤岛划分,避免故障面积扩大,同时保障供电安全。

2.1 限制 DG 的准入容量

为了确保配电网安全可靠运行, DG 的接入要受到各种限制。国内外已有许多文献从不同的约束条件入手,对 DG 在配电网中的接入位置和准入容量进行了分析。如考虑继电保护动作^[11]、保护可靠性^[12]、谐波约束^[13-14]、保护间配合约束^[14]、电压约束^[15-16]和孤岛运行^[17]等条件对准入容量的影响。

考虑 DG 接入配网的准入容量,能在保证供电质量的同时充分利用 DG,对缓解供电压力、降低发电污染等都具有一定的意义。然而,当前准入容量的计算基本都只针对一个或几个约束条件,缺少综合全面考虑的方案。此外,当前对准入容量的研究都是以稳定正常运行状态作为前提,没有对 DG 并网过程、系统故障等特殊状态进行考虑,因此得到的准入容量多偏于乐观。值得指出的是,在不改变原有继电保护配置的前提下, DG 的准入容量很小,适当选取其他保护改进方案,能极大提高准入容量,因此,有必要将其他保护改进方案与准入容量分析相结合,从而提高供电可靠性,同时提升 DG 的允许接入容量。

2.2 改进的自适应保护方案

由于 DG 的接入,可能会造成保护误动、灵敏度下降等问题,原保护的整定值已不再适用。为了适应 DG 对配网保护的影响,众多学者提出了考虑 DG 接入的配网自适应保护方案。文献[18-19]分别根据支路贡献因子和故障电流变化量,消除了 DG 对保护整定值的影响。文献[20-22]分别通过分支系数、整定系数、实际等值阻抗及等值电势的自适应计算,来实现保护的自适应整定。文献[23]根据实时测取的故障类型和相电流值来设置自适应的电压保护机制。文献[24]根据不同故障类型和故障位置下的复合序网络,对不同情况下的保护整定值进行了分析。文献[25]改变了传统保护整定值的推算方向,改从下游向上游递推整定值,从而减少特殊情况下的保护动作时间。

改进的自适应保护方案只需在原有保护配置的基础上加装少量方向元件、智能电子设备(Intelligent Electronic Devices, IEDs),并调整原有保护的整定方案,就能较好地实现含 DG 的配网保护。成本较低、易于实现,且动作速度快,能在一定程度上适应网络变化和 DG 运行方式的变化,是具有实际工程可行性的方案。然而,部分改进保护方案没有考虑 DG 渗透率较高时对整定值的影响,其方案不能应用于多 DG 接入的配电网。此外,现有的改进保护方案并不能适用于所有网络运行状态,如孤岛运行状态等,这表明自适应保护方案仍需要与其他保护方案配合,才能实现含 DG 的配网保护。

2.3 基于通信技术的故障定位

当接入配网的 DG 容量较小、供电距离较短时,传统的故障定位规则仍能正确定位,但当接入容量较大、供电距离较长、电机类 DG 较多时,就需要对原有的故障定位规则进行改进^[26]。文献[27-30]构造了故障区段定位的数学模型,并采用和声算法、

粒子群算法、遗传算法等对其进行求解,从数学角度解决故障定位问题。文献[31-35]通过馈线终端单元(Feeder Terminal Unit, FTU)等通信设备进行信息交互,根据配网中的电流幅值相位、保护动作情况、功率方向信息以及单位故障距离来判断故障区段。文献[36-39]利用基于配电网自动化的多代理系统(Multi-Agent System, MAS)对故障进行定位,并对不同位置的故障进行处理,提高了灵活性和可靠性。

基于通信技术来实现故障定位,通过对多点信息的采集、传输、处理、应用,实现精准的故障处理过程。适应性和全面性极强,能较好地适应网络和 DG 运行方式的灵活变化,是未来配电网保护发展的大方向。然而,基于通信技术的故障定位也有其固有的缺点。首先,过于依赖通信技术,用于判断的信息越多,系统可靠性也可能随之下降;其次,信息的采集、传输、处理、应用过程都需要耗费时间,这无疑会对保护的快速性造成影响;最后,成本较高、经济性较差,在我国很难实现全面的普及推广。

2.4 孤岛检测

传统的孤岛检测可以分为远程检测、本地检测两种方法^[40]。由于远程检测法需要大量通信设备,成本高且操作复杂,当前国内外学者的研究方向主要集中于本地检测方法。本地检测主要依靠本地测量参数来进行孤岛检测,相对远程检测成本低廉,又可以分为被动检测(又称无源检测)、主动检测(又称有源检测)以及混合检测三类。

被动检测通过检测公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)处的电压、频率、相位和谐波等参数来检测孤岛。由于电压/频率检测法、电压谐波检测法、电压相位突变法等传统被动检测法具有检测盲区(Non-Detection Zone, NDZ),当前主要研究方向在于消除 NDZ,提高检测精度和速度。文献[41-42]考虑了新的检测参数,其中,前者引入了电压相位变化量与负荷电压变化量之比 $\Delta\phi/\Delta V_L$,后者则将电压变化值引入到无功控制策略中,从而消除 NDZ。文献[43-45]通过“特征量提取+模式识别”来实现孤岛检测,其中,文献[43-44]对 PCC 处的电压、电流信号进行小波分析,提取孤岛时的特征量,文献[45]采用随机森林分析法(Random Forest, RF)对多种参数进行模糊识别,来区别孤岛状态和非孤岛状态。文献[46-48]采用多重检测模块综合检测孤岛,其中,文献[46]基于三相电压的总谐波失真率和电压不平衡变化率,利用现有孤岛检测中的故障检测信息进行状态判断,文献[47]考虑了正常运行状态下 DG 电流质量的影响,将有功控制、无功控制、最大功率点跟踪和锁相环应用于孤岛检测,文献[48]先通过频率测量及功率方向测量模块进行测

量, 再采用投票监测逻辑法实现检测。

主动检测向 DG 系统注入扰动, 通过检测 PCC 处的系统响应, 来实现孤岛检测。阻抗测量法、主动移频法、谐波电流扰动法等传统方法会使电网的电能质量下降, 且检测速度较慢, 难以处理多 DG 系统的孤岛检测问题, 当前主要研究方向在于减少污染、提高检测速度以及多 DG 系统的孤岛检测。文献[49]对传统阻抗测量法进行改进, 通过晶闸管人为产生的瞬时短路电流和电压, 来判断是否处于孤岛状态。文献[50]通过模糊控制, 优化了传统移频法的参数, 从而完成无盲区的快速检测。文献[51-52]将锁相环与传统谐波电流扰动法相结合, 解决了多 DG 系统的扰动同步问题。

混合检测是将被动检测和主动检测相结合的检测方法。由于被动检测具有 NDZ, 难以消除, 而主动检测会影响电能质量, 造成污染, 混合检测以被动检测为基础, 当被动检测无法正常检测时, 则进行主动检测。因此, 混合检测消除了 NDZ, 同时将扰动降到最小, 克服了被动检测和主动检测的缺点, 同时提高了检测精度和速度, 是未来研究的主要方向。文献[53]将电压不平衡变化率法与高频阻抗测量法相结合, 由于高频阻抗测量法不会改变系统参数, 因此不会造成系统不稳定。文献[54]将决策树分类法与 Sandia 频率偏移法相结合, 考虑了暂态情况下的孤岛检测。文献[55]将频率变化率法(Rate Of Change Of Frequency, ROCOF)与优化 Sandia 频率偏移法相结合, 能较好地适应多机系统和负荷切换情况。

综上所述, 检测参数较少时, 被动检测精度较低, 可能具有 NDZ; 而检测参数较多时, 被动检测的检测速度较慢, 检测时间长; 检测精度和检测速度往往不能兼容, 需要根据实际需求做出一定的取舍。主动检测对电能质量的影响难以完全根除, 尤其对含多 DG 的配网系统, 主动检测法造成的污染可能会随接入 DG 数而呈几何增长。混合检测法是最具有发展前景的孤岛检测方法, 吸收了被动检测和主动检测各自的优点, 适用于多 DG 系统, 且能适应功率不平衡、负荷切换等特殊运行状态。然而, 混合检测法大都基于逆变型 DG, 不能解决含电机类 DG 的孤岛检测问题, 缺少对所有 DG 都适用的通用方案, 这是当前需要解决的一大问题。

2.5 孤岛划分

合理地进行孤岛划分, 能够有效地提高地供电可靠性, 减少不必要的停电, 同时能够有效避免事故面积扩大。对于配电网的最优孤岛划分方案, 众多学者综合考虑了功率平衡、网络损耗、DG 出力

波动性^[56]、负荷优先级、负荷可控程度、负荷波动性、联络开关影响、DG 同调等因素。孤岛划分方法可分为图论划分法、树背包法和启发式搜索法。

基于图论的孤岛划分方法又可分为无向图模型法和有向图模型法。无向图模型法将孤岛划分问题转化为最小生成树问题, 文献[57-60]分别采用改进 Prim 算法、改进 Kruskal 算法、Sollin 算法、Kruskal 算法+改进遗传算法来求解最小树问题, 文献[61]则采用谱聚类方法, 分两步解决了实时孤岛划分问题, 文献[62]将慢同调分群算法与 K 路划分(K-Way Partitioning, KWP)相结合, 考虑发电机同调性的同时, 对配电网拓扑图进行图划分。相比于无向图法, 有向图模型法能更好地保证孤岛区域的连通性和辐射状, 文献[63]引入“虚拟节点”和“虚拟需求”建立了有向图模型, 并在模型基础上对孤岛划分问题进行求解。

树背包法将最优孤岛划分问题转化为树背包问题(Tree Knapsack Problem, TKP), 通过“搜索+调整”的策略来解决多 DG 的孤岛划分问题。文献[64]采用分支定界算法来求解 TKP, 文献[65]将隐枚举法与蚁群算法结合, 提出了孤岛划分与重构优化方案, 文献[66]先基于 TKP 构造了随机划分模型, 再通过确定性树背包算法等 3 种算法确定孤岛组成, 最后基于随机最优潮流对划分方案进行了优化。

启发式搜索法将启发式搜索算法应用于孤岛划分。文献[67-68]分别基于改进的蚁群算法和非支配排序粒子群算法(Non-dominated Sorting Particle Swarm Optimization, NSPSO)解决了配网重构问题, 文献[69]将二进制粒子群算法(Binary Particle Swarm Optimization, BPSO)和二进制差分进化算法(Binary differential Evolution, BDE)相结合, 在故障重构过程中进行孤岛划分, 从而找到最优的孤岛划分方案。

现有划分方案从功率平衡、DG 同调等因素入手, 保障了系统的静态安全性, 但却往往没有考虑孤岛并网模式切换、动态稳定性等方面的约束。图论问题和树背包问题都是运筹学领域中典型的 NP 问题, 当前提出的图论划分法和树背包法往往难以兼具计算速度和准确性。当配电网发生重大事故, 划分算法涉及大量开关器件时, 现有方法往往会陷入“维数灾难”, 无法保障所给方案的最优性。启发式搜索法从纯数学角度解决孤岛划分问题, 工程应用前景稍差, 搜索算法本身具有一定的局限性, 可能会陷入局部最优, 需要其他手段帮助跳出局部最优点, 但这又增加了算法的复杂性。

3 结论

研究 DG 接入的配电网保护方案,是保障供电可靠性及安全稳定运行水平的重要手段。本文在分析 DG 接入对原有保护影响的基础上,对含 DG 的配网保护改进方案做了综合研究,主要包括:(1)限制 DG 的准入容量;(2)改进的自适应保护方案;(3)基于通信技术的故障定位;(4)孤岛检测;(5)孤岛划分,并指出了各方案的优缺点及发展方向。其中,方案(1)从限制 DG 对配电网影响的角度出发,不改变原有保护,经济性好,但适应性差,需要与其他方案相结合,从而提高 DG 的准入容量;方案(2)加装少量元件,并对原有整定方案进行了调整,易于实现,但不能完全兼容 DG 灵活的运行方式;方案(3)依靠通信手段,准确性高,全面性强,但成本较高,过于依靠通信设备,保护的可靠性和快速性可能随电网规模的变大而下降;方案(4)考虑了不可控孤岛运行情况,通过快速检测并将其消除来保障系统安全;方案(5)在紧急情况下主动划分孤岛,从而保障重要负荷的供电,避免故障范围扩大。

综合上述 5 种方案,对含 DG 的配电网,应以改进的自适应保护方案作为主体保护,部分重要区域则通过通信技术实现故障定位,从而在保障保护的全面性和适应性的同时提高 DG 的准入容量。对接入配网的所有 DG 都应配置孤岛检测装置,检测装置与相应 DG 的保护进行通信,当出现不可控孤岛时,保护快速动作将其断开,以避免其对电网产生的恶劣影响。对部分重要区域,可将基于通信技术的故障定位与孤岛划分相结合,在故障发生时保护动作切除故障,同时形成多个能够稳定运行的孤岛系统,实现并网运行和孤岛运行两种状态下的保护。

参考文献

- [1] 王树东, 钱其三. 分布式电源对配电网保护的影响分析及改进方案[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014, 28(1): 87-90.
WANG Shudong, QIAN Qisan. Effect of distributed generation on relay protection of distributed network and improved protection scheme[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2014, 28(1): 87-90.
- [2] 乔明, 王莹, 杨波, 等. 含分布式电源的配电网保护技术[J]. 黑龙江电力, 2016, 38(2): 127-130.
QIAO Ming, WANG Ying, YANG Bo, et al. Distribution protection with distributed power[J]. Heilongjiang Electric Power, 2016, 38(2): 127-130.
- [3] 田书, 刘颖, 梅小丽. 分布式电源并网对配电网电流保护影响的研究[J]. 工矿自动化, 2011(10): 39-43.
TIAN Shu, LIU Ying, MEI Xiaoli. Research of influence of grid connection of distributed generation on current protection of distribution network[J]. Industry and Mine Automation, 2011(10): 39-43.
- [4] VIJETA K, SARMA D. Protection of distributed generation connected distribution system[C] // Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET), 2012 International Conference on: IEEE, 2012: 1-6.
- [5] 郭煜华, 姜军, 范春菊, 等. 改进的配电网反时限过电流保护[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 45-50.
GUO Yuhua, JIANG Jun, FAN Chunju, et al. Improved inverse-time over-current protection for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 45-50.
- [6] 赵月灵, 李华忠, 孙鸣. 分布式电源接入对变电站距离保护及重合闸的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 217-219.
ZHAO Yueling, LI Huazhong, SUN Ming. Effect of DG on the distance protection and recloser of transformer substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 217-219.
- [7] 姜宪国, 王增平, 张执超, 等. 基于过渡电阻有功功率的单相高阻接地保护[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 187-193.
JIANG Xianguo, WANG Zengping, ZHANG Zhichao, et al. Single-phase high-resistance fault protection based on active power of transition resistance[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 187-193.
- [8] 邵能灵, 冯希科. 分布式电源对配电网自动重合闸的影响研究[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(1): 21-26.
TAI Nengling, FENG Xike. Distributed generation impact to distribution network's auto-reclosing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(1): 21-26.
- [9] WALLING R A, SAINT R, DUGAN R C, et al. Summary of distributed resources impact on power delivery systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1636-1644.
- [10] 张勇. 分布式发电对电网继电保护的影响综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 145-151.
ZHANG Yong. Review of impact of distributed generation on distribution system protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2010, 22(2): 145-151.
- [11] 王江海, 邵能灵, 宋凯, 等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 37-43.
WANG Jianghai, TAI Nengling, SONG Kai, et al.

- Penetration level permission of for DG in distributed network considering relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 37-43.
- [12] WU L J, CHEN X Y, LIU J, et al. Calculating the maximum penetration capacity of distributed generation considering current protection[C] // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2014, 672: 1257-1261.
- [13] 钟清, 高新华, 余南华, 等. 谐波约束下的主动配电网分布式电源准入容量与接入方式[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 108-113.
ZHONG Qing, GAO Xinhua, YU Nanhua, et al. Accommodating capacity and mode of distributed generation under harmonic constraint in active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 108-113.
- [14] PANDI V R, ZEINELDIN H H, XIAO W. Determining optimal location and size of distributed generation resources considering harmonic and protection coordination limits[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1245-1254.
- [15] SHENG W, ZHAO S, SONG X, et al. Maximum penetration level of distributed generation in consideration of voltage fluctuations based on multi-resolution model[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2014, 9(3): 241-248.
- [16] 马越, 陈星莺, 余昆, 等. 基于灵敏度分析法的分布式电源准入功率计算[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(9): 18-22.
MA Yue, CHEN Xingying, YU Kun, et al. Calculation of the maximum penetration level of distributed generation based on sensitivity analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(9): 18-22.
- [17] 耿波, 陈琳, 王康. 考虑孤岛检测盲区的分布式电源准入功率计算[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(8): 44-49.
GENG Bo, CHEN Lin, WANG Kang. Penetration level calculation of distributed generators with consideration of island non-detection zone[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(8): 44-49.
- [18] 马静, 王希, 米超, 等. 含分布式电源的配电网自适应保护新方法[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 204-208.
MA Jing, WANG Xi, MI Chao, et al. A new adaptive protection approach for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 204-208.
- [19] 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 Xiaohui. An adaptive protection scheme for meshed distribution system with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 110-115.
- [20] 李文泉, 李岁寒, 王上行, 等. 含分布式电源的配网自适应距离保护方案[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(9): 1-4.
LI Wenquan, LI Suihan, WANG Shangxing, et al. An adaptive distance protection scheme for distribution system with distributed generation[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(9): 1-4.
- [21] MA J, MA W, QIU Y, et al. An adaptive distance protection scheme based on the voltage drop equation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1931-1940.
- [22] 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 Jingliao, LI Yongli, LI Shengwei, 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.
- [23] MA J, MA W, WANG X, et al. A new adaptive voltage protection scheme for distribution network with distributed generations[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2013, 36(4): 142-151.
- [24] 陈晓龙, 李永丽, 谭会征, 等. 含逆变型分布式电源的配电网自适应正序电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 107-112.
CHEN Xiaolong, LI Yongli, TAN Huizheng, et al. An adaptive instantaneous trip protection based on positive-sequence current for distribution network with IBDG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 107-112.
- [25] COFFELE F, BOOTH C, DUSKO A. An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 561-568.
- [26] 刘健, 张小庆, 同向前, 等. 含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 36-48.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, TONG Xiangqian, et al. Fault location for distribution systems with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 36-48.
- [27] 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.
- [28] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 36-41.
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [29] 付家才, 陆青松. 基于蝙蝠算法的配电网故障区间定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 100-105.
FU Jiakai, LU Qingsong. Fault sections location of distribution network based on bat algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 100-105.
- [30] 田果, 黄小莉, 邓强, 等. 基于图论的智能配电网馈线保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 95-99.
TIAN Guo, HUANG Xiaoli, DENG Qiang, et al. Feeder protection based on graph theory in smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 95-99.
- [31] 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 Yuping, WANG Lianhe. New current protection scheme considering distributed generation impact[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 50-56.
- [32] 孙景钊, 陈荣柱, 蔡轼, 等. 含分布式电源配电网的故障定位新方案[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1645-1650.
SUN Jingliao, CHEN Rongzhu, CAI Shi, et al. A new fault location scheme for distribution system with distributed generations[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1645-1650.
- [33] 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. Protection and control scheme for smart distribution grid with distributed resource[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 9-14.
- [34] 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 Yanxia, DAI Fengxian. New schemes of feeder protection for distribution networks including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 71-74.
- [35] ALWASH S F, RAMACHANDARAMURTHY V K, MITHULANANTHAN N. Fault-location scheme for power distribution system with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1187-1195.
- [36] 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): 101-105.
HU Hanmei, ZHENG Hong, ZHAO Junlei, 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): 101-105.
- [37] 席建新, 郑涛, 徐庆. 基于 Multi-agent 的含分布式电源配电网故障处理方法[J]. 现代电力, 2012, 29(6): 33-37.
XI Jianxin, ZHENG Tao, XU Qing. A fault treatment method for distribution network with distributed generations based on MAS[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(6): 33-37.
- [38] 贾浩帅, 郑涛, 赵萍, 等. 基于故障区域搜索的配电网故障定位算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 62-66.
JIA Haoshuai, ZHENG Tao, ZHAO Ping, et al. Fault location algorithm for distribution system based on fault region searching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 62-66.
- [39] LI J Q, YING W, CUI J H, et al. Multi-agent system wide area protection considering distributed generation impact[C] // International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP): IEEE, 2011, 1: 549-553.
- [40] 程启明, 王映斐, 程尹曼, 等. 分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 147-154.
CHENG Qiming, WANG Yingfei, CHENG Yinman, et al. Overview study on islanding detecting methods for distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 147-154.
- [41] 贺眉眉, 李华强, 甘立勇, 等. RLC 负荷模型分布式发电孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 7-11.
HE Meimei, LI Huaqiang, GAN Liyong, et al. Islanding detection scheme evaluation for RLC load distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 7-11.
- [42] CHEN X, LI Y. An islanding detection algorithm for inverter-based distributed generation based on reactive power control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,

- 2014, 29(9): 4672-4683.
- [43] 贺眉眉, 李华强, 陈静, 等. 基于离散小波变换的分布式发电孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 103-108.
HE Meimei, LI Huaqiang, CHEN Jing, et al. Islanding detection based on discrete wavelet transform for distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 103-108.
- [44] 谢东, 张兴, 曹仁贤. 基于小波变换与神经网络的孤岛检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 537-544.
XIE Dong, ZHANG Xing, CAO Renxian. Islanding detection based on wavelet transform and neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 537-544.
- [45] FAQHRULDIN O N, EL-SAADANY E F, ZEINELDIN H H. A universal islanding detection technique for distributed generation using pattern recognition[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1985-1992.
- [46] LAAKSONEN H. Advanced islanding detection functionality for future electricity distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2056-2064.
- [47] SERBAN E, PONDICHE C, ORDONEZ M. Islanding detection search sequence for distributed power generators under AC grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3106-3121.
- [48] ANNE R K M, BASHA F K, PALANIAPPAN R, et al. Reliable generator islanding detection for industrial power consumers with on-site generation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(1): 668-676.
- [49] 朱珂, 卢晓惠, 于青, 等. 基于可控短路技术的系统阻抗测量方法在孤岛检测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 119-124.
ZHU Ke, LU Xiaohui, YU Qing, et al. A novel method of impedance measurement used in islanding detection based on controllable short-circuit technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 119-124.
- [50] 郑涛, 袁飞, 王燕萍, 等. 基于模糊控制的快速无盲区的频移式孤岛检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 38-43.
ZHENG Tao, YUAN Fei, WANG Yanping, et al. A fast frequency drifts islanding-detecting method without non-detecting zone based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 38-43.
- [51] 张琦, 孙向东, 钟彦儒, 等. 用于分布式发电系统孤岛检测的偶次谐波电流扰动法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 112-119.
ZHANG Qi, SUN Xiangdong, ZHONG Yanru, et al. Even harmonic current disturbing method for islanding detection in the distributed power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 112-119.
- [52] 贝太周, 王萍, 蔡蒙蒙. 注入三次谐波扰动的分布式光伏并网逆变器孤岛检测技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 44-51.
BEI Taizhou, WANG Ping, CAI Mengmeng. An islanding detection method with the third harmonic injection for distributed grid-connected PV inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 44-51.
- [53] MOHITI M, MAHMOODZADEH Z, VAKILIAN M. A hybrid micro grid islanding detection method[C] // International Conference on Environment and Electrical Engineering: IEEE, 2013: 342-347.
- [54] AZIM R, LI F, ZHAO X. A hybrid islanding detection technique for inverter based distributed generations[C] // Electrical Power and Energy Conference (EPEC): IEEE, 2015: 239-243.
- [55] KHODAPARASTAN M, VAHEDI H, KHAZAEI F, et al. A novel hybrid islanding detection method for inverter-based DGs using SFS and ROCOF[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 99: 1-1.
- [56] 李滨, 祝靖, 李佩杰, 等. 含非可靠分布式电源的配电网孤岛划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 59-65.
LI Bin, ZHU Jing, LI Peijie, et al. Island partition of distribution network with unreliable distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 59-65.
- [57] 董晓峰, 陆于平. 基于改进 Prim 算法的分布式发电孤岛划分方法[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 195-201.
DONG Xiaofeng, LU Yuping. Islanding algorithm for distributed generators based on improved Prim algorithm[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 195-201.
- [58] 刘宗歧, 鲍巧敏, 孙春山, 等. 基于改进 Kruskal 算法的含分布式发电的配网孤岛划分算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 164-171.
LIU Zongqi, BAO Qiaomin, SUN Chunshan, et al. Islanding algorithm of distribution system with distributed generations based on improved Kruskal algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 164-171.
- [59] 曾令诚, 吕林, 曾澜钰. 基于 sollin 算法的含分布式电源的孤岛划分方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 95-100.
ZENG Lingcheng, LÜ Lin, ZENG Lanyu. Islanding

- method based on sollin algorithm for grid with distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 95-100.
- [60] 冯雪平, 宋晓辉, 梁英, 等. 基于最小生成树及改进遗传算法的含分布式电源配电网孤岛划分方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3470-3478.
- FENG Xueping, SONG Xiaohui, LIANG Ying, et al. Islanding method based on minimum spanning tree and improved genetic algorithm for distribution system with DGs[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3470-3478.
- [61] DING L, GONZALEZ-LONGATT F M, WALL P, et al. Two-step spectral clustering controlled islanding algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 75-84.
- [62] SONG H L, WU J Y, WU L F. Controlled islanding based on slow-coherency and KWP theory[C] // Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia): IEEE, 2012: 1-6.
- [63] 胡哲晟, 郭瑞鹏, 蓝海波, 等. 基于有向图的含分布式电源配电网孤岛划分模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 97-104.
- HU Zhesheng, GUO Ruipeng, LAN Haibo, et al. Islanding model of distribution systems with distributed generators based on directed graph[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 97-104.
- [64] LIN J K, WANG X D, WU P, et al. Two-stage method for optimal island partition of distribution system with distributed generations[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2012, 6(3): 218-225.
- [65] 向月, 刘俊勇, 姚良忠, 等. 故障条件下含分布式电源配网的孤岛划分与重构优化策略研究[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1025-1032.
- XIANG Yue, LIU Junyong, YAO Liangzhong, et al. Optimization strategy for island partitioning and reconfiguration of faulted distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1025-1032.
- [66] 李飞, 徐弢, 林济铿, 等. 计及分布式电源出力及负荷不确定性的配电网孤岛划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 105-113, 132.
- LI Fei, XU Tao, LIN Jikeng, et al. Island partition of distribution network considering uncertainty of distributed generators and loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 105-113, 132.
- [67] WANG G, LI L, ZHANG T Y. An improved ant colony search algorithm for reconfiguration of distribution network with distributed generations[C] // Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). IEEE, 2012: 1-4.
- [68] TULADHAR S R, SINGH J G, ONGSAKUL W. A multi-objective network reconfiguration of distribution network with solar and wind distributed generation using NSPSO[C] // International Conference and Utility Exhibition 2014 on Green Energy for Sustainable Development: IEEE, 2014: 1-7.
- [69] 周淦, 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.

收稿日期: 2016-06-22; 修回日期: 2016-09-15

作者简介:

王鲍雅琼(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 1016133445@qq.com

陈皓(1962—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统微机保护与控制。

(编辑 姜新丽)