

DOI: 10.7667/PSPC160378

配电网和微网中分布式电源选址定容方法对比分析

李军¹, 颜辉¹, 张仰飞¹, 张玉琼¹, 金华锋², 郝思鹏¹, 吕干云¹

(1. 南京工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 浙江宁波供电公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 从分布式电源选址定容算法分析入手, 对分布式电源选址定容在配电网和微网中应用的差异化方案进行了综述。首先, 对分布式电源并网接入的载体——配电网和微网(Micro-Grid, MG), 从拓扑结构、对外接口等物理特性和故障前、后运行方式等运行特性进行了分析比较, 两种载体存在一定的相似性。然后, 从优化目标、优化算法方面分析比较了分布式电源在配电网和微网选址定容的相互借鉴性和差异性, 指出: 在考虑不同设备接入、不同约束条件的基础上, 分布式电源选址定容优化目标通常为经济性和/或可靠性, 而在结合具体应用场合时会体现出不同方案的差异性; 进而从优化目标的侧重点设定、运行方式的差异、储能接入的位置与容量等方面对分布式电源选址定容问题在配电网与微网中的异同点进行了具体的比较。最后指出在考虑前述异同点以外, 还应该对优化目标最终达成度、接入设备的精细化建模程度、网络自身调整能力三个方面进行考虑, 使最终选址定容方案能够服务于未来实际工程的需要。

关键词: 分布式电源; 选址定容; 主动配电网; 配电网重构; 配电网规划

Comparison of locating and sizing methods of DGs between in micro-grids and in distribution network

LI Jun¹, YAN Hui¹, ZHANG Yangfei¹, ZHANG Yuqiong¹, JIN Huafeng², HAO Sipeng¹, LÜ Ganyun¹

(1. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. Ningbo Supply Power Company, Ningbo 315000, China)

Abstract: This paper reviews DGs' locating and sizing methods applied in micro-grids and in distribution network, and compares them in the above two applications. Firstly, comparison of physical characteristics including topology and outside port to grid, and operation modes including all kinds of modes before and after faults, is carried out between the micro-grids and distribution network. According to the fore-mentioned comparison, the similarities are found, and then the analysis and comparison of DGs' sizing and locating problems are implemented deeply as follows. Following problems are pointed out: firstly, the economic or/and reliability objectives are commonly selected, while the difference of the practical applications in specific situations will result in the final different schemes. Secondly, the comparison in the direct and indirect connections of DGs is carried out deeply according to the optimal objectives, operation modes, the access of distributed storage units, et al. Finally, besides the above difference points, three aspects concerning the reachable degree of the assigned objective, the meticulous modeling on certain equipments connected into grid, the regulative capability of grid consisting of some topology adjusting equipments and power quality improvement equipments, are discussed further to help the practical engineering.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577086), Opening Fund of Jiangsu Distribution Network Collaborative Innovation Center (No. XTCX201606), Scientific Research Fund of Nanjing Institute of Technology (No. CKJA201406), and Jiangsu Provincial Prospective Joint Research Foundation for Industry-University-Research, China (No. BY2015009-03).

Key words: distributed generation resources; locating and sizing; active distribution network; distribution network reconfiguration; distribution network planning

0 引言

随着能源紧缺、环境污染等问题的出现, 实现

基金项目: 国家自然科学基金(51577086); 江苏省电网协同创新中心开放基金(XTCX201606); 南京工程学院科研基金(CKJA201406); 江苏省产学研前瞻性项目(BY2015009-03)

能源供给多样化, 增加能源的可循环开发利用, 显得愈加重要^[1]。分布式发电(Distributed generation, DG)作为一种新兴的技术, 能够独立、分散地布置在用户附近, 满足用户特定需求。基于就地取能、就地消耗的原则, DG 供电具有灵活性高、污染小、线路损耗低等特点, 其接入电网主要有两种形式: 直接接入配电网和以微网形式接入配电网。二者的

接入主体从拓扑结构上看,通常采用辐射型接线方式。从运行方式上看,微网兼具并网与孤岛两种运行方式;而配电网通常并网运行,在配电变压器侧或者配电网内部发生故障的情况下,依托于分布式电源供电和拓扑重构技术,能够实现 DG 独立向负荷短时供电,形成临时性的孤岛供电区域。两种网络在拓扑接线与运行方式上存在相似性,比较两种运行场合下分布式电源选址定容的差异性具有一定的研究意义。

本文探讨了分布式电源的选址定容在主动配电网与微网应用方案后,对该领域的国内外相关成果进行了较为全面的梳理,分析了各类方法的优缺点;同时对 DG 的选址定容在主动配电网与微网中的异同点进行了分析、比较、归纳,以供后续研究借鉴。

1 配电网和微网运行方式的比较

1.1 配电网运行

正常情况下,传统配电网单电源/单向潮流供电。随着分布式电源的接入,配电网内部功率流发生变化,逐渐向多电源/双向潮流转变,演变为主动配电网(Active Distribution Network, ADN),进而演变为主动配电系统(Active Distribution System, ADS)。ADN的概念由国际大电网(CIGRE)会议C6.11工作组提出,2012年CIGRE会议上C6.19工作组将其扩充为ADS,强调未来的配电网是一个通过对分布式电源、储能系统、电动汽车充换电设施和可控负荷的主动控制而具有优化运行能力的有机系统^[2]。

正常运行情况下,主动配电网内分散的电源、负荷可以接受上层集中调度或独立运行。当电源和负荷数量达到一定程度时,考虑到数据通信的压力,需要借助中间代理机构,将部分区域内的DG、

储能、可控负荷整合为一个虚拟发电厂(Virtual Power Plant, VPP)^[3],作为一个整体参与电网运行。借助该技术,ADN可以实现分区调度运行。

当配电网故障时,借助于 DG 的潜在供电能力和配网重构技术,通过合理的控制分段开关与联络开关,选择供电路径,保证重要负荷的持续供电。

1.2 微网运行

对于微网而言,根据美国 CERTS (Consortium for Electric Reliability Technology Solutions)提出的典型微网分区供电结构,微网通过公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)与配电网相连^[4]。正常情况下,微网并网运行,与配电网共同承担负荷;当配电网发生故障时,微网将进入孤岛运行状态,单独向微网内部负荷供电。在此情况下,配电网中的虚拟发电厂代理运行方式与微网正常运行方式有很大的相似性,也存在差异,主要表现在:

- 1) 微网强调的是自治,虚拟发电厂强调的是参与;
- 2) 虚拟发电厂只能并网运行,而微网可以在并网与孤岛之间平滑的切换;
- 3) 虚拟发电厂是从结构上看是对元件的整合和管理,没有明显的边界;而微网是硬件、软件 and 技术的融合,具有明显的边界。

正是这些差异,致使 DG 接入在配电网中着重考虑并网时的选址定容,而微网对于并网与孤岛两种方式下的选址定容需要兼顾。

配电网与微网的差异性比较如表 1 所示。二者的正常运行方式和故障后运行方式存在一定的相似性,故 DG 的选址定容亦存在相互借鉴的作用。

表 1 配电网与微网物理特性及运行方式比较

Table 1 Comparison of physical characteristics and operating modes between distribution network and micro-grids

		主动配电网(ADN)	微网(MG)
拓扑结构		1) 闭环设计,开环运行; 2) 多为辐射结构。	1) 通常都是单母线或多母线设计; 2) 大多数辐射结构。
对外接口		1) 通常以配电网变压器作为联网接口; 2) 通常为 1 个接口,为了保障供电可靠性,可以有 2 个不同位置的接口。	1) 通常以 PCC 点处的隔离变压器或背靠背电力电子式变压器为并网接口; 2) 通常只有 1 个统一的对外接口。
运行方式	并网	1) 通常联网运行; 2) 借助电能质量调节装置,可提供初步的电能质量定制服务	1) 通常并网运行; 2) 根据微网所有权和运行目标的不同,可以提供精细化的定制电力服务,并与主网进行电力交易。
	离网	配电变压器故障后, DG 可向附近区域部分重要负荷临时供电。	1) 并网型微网在主网故障情况下,切换为短时孤岛运行,并保障微网内部重要负荷的供电; 2) 离网型微网通常位于海岛、荒漠,长期离网运行,内部功率自平衡。
边界范围	并网	虚拟发电厂技术(VPP),临时组网,边界模糊。	并网和离网两种模式,均以 PCC 点为界,将微网内部电源/负荷与外界主网隔离,界限明显。
	离网	配电变压器故障后, DG 附近区域部分重要负荷临时供电,边界模糊。	

2 配电网中 DG 的选址定容

分布式电源大规模地接入配电网, 改善配电负荷供电可靠性的同时, 也给配电网的继电保护配置、电能质量带来一定的影响。而影响的大小与 DG 的接入位置及接入容量密切相关。为此, 国内外的专家学者针对配电网中 DG 的选址定容问题分别从优化目标与优化算法两个方面进行了广泛的研究。

从优化目标上来看, 文献[5-9]以网络的建设成本与运行费用最小为优化目标, 其中文献[7-8]计及了网络损耗最小的优化目标, 重点考虑了温室气体(CO₂、SO₂等)的排放; 文献[9]重点考虑了负荷变化情况下的容量配置状况的情况; 文献[10]在分布式电源位置、容量和个数未知但分布式电源总容量已知的情况下, 采用遗传算法进行了优化设计, 但是文献未计及分布式电源的投资费用。部分学者在前面研究的基础上, 将 DG 接入位置进行了综合考虑。文献[11]在给定分布式电源容量的情况下, 采用解析法研究了单条辐射线路上分布式电源的最优安装位置, 且假定负荷沿着馈线均匀分布, 而实际配电网中除楼宇负荷外, 其余负荷分布均具有随机性, 假定显然不具有一般性。文献[12]将分布式电源安装在给定位置并逐步增加容量, 直到网络损耗值最小, 从而确定了安装位置已知情况下的最优安装容量。文献[13]在考虑了总成本与可靠性的情况下, 考虑了可控的分布式电源的选址。

随着研究的深入, 选址定容优化目标的求解过程中对源(DG)、荷(负荷)的建模更加精细化, 比如对 DG 出力和负荷需求进行不确定性概率建模^[14-16]; 将 DG 的种类进行了扩充, 比如包括了电动汽车类的特殊 DG^[16-17]。但优化目标的设计没有出现根本性的变化。文献[14]在优化配置中考虑了风电、光伏和微型燃气轮机 3 种 DG 的选址和定容; 并针对输出功率不确定的风力发电、光伏发电和电动汽车建立了概率模型, 利用蒙特卡洛模拟法将随机性问题转化为确定性问题; 文献[15]针对光伏出力的随机性和负荷的波动性, 提出了一种多场景光伏发电-负荷混合概率模型, 并进而建立光伏发电的选址和定容模型。文献[16]在规划中考虑风速和负荷间的时序相关性, 采用联合概率分布法对其进行多场景构建, 建立了需求侧管理模式下的风电机组选址定容双层规划模型。文献[17]建立了考虑了路径选择模型与交通满意度评价指标的电动汽车充电站与分布式电源定容选址模型。

同时DG选址定容方法也进入到设计实施阶段。文献[18]从工程实践角度, 采用“分步推进”和“一

步一反馈”的DG选址定容渐进优化设计流程, 获得最终设计方案, 并在实际的配电网规划中实施。

综上, 在分布式电源选址定容的优化目标上, 已有文献重点考虑了经济性因素与可靠性因素, 在此基础上, 综合考虑了一些负荷增长、温室气体排放等其他因素, 建立了多目标优化的模型, 但考虑因素侧重点的不同, 导致了在各个优化设计方案之间存在着差异性。

从优化算法的选取上看, 合理的求解算法, 对于 DG 的选址定容结果具有重要的影响。优化算法可以划分为传统的数学算法和人工智能算法两大类。其中传统数学算法以解析法^[9]为代表; 人工智能算法以遗传算法^[3,5-8]、粒子群算法^[12-14]、差分进化算法^[16]、自由搜索算法^[18]、Tabu 搜索算法^[19]为代表, 但是上述算法各有优缺点。解析法能够清晰地表征各个变量之间的关系, 但是对于复杂的问题不易实现精确建模、求解。人工智能算法中的遗传算法设计繁杂, 求解过程中收敛速度慢、封闭竞争; 粒子群算法简单易行、速度快、鲁棒性好, 后期收敛速度快, 但存在早熟问题, 可考虑与 Tabu 搜索算法相结合来提高收敛性能等。因此针对配电网中分布式电源的选址定容问题, 需要全面考虑各种影响因素, 建立一种简单易行且具有良好的寻优效果的算法。

3 微网中 DG 的选址定容

配电网内部负荷主要由上层的电网来供电, 稳定性较好。对于微网这类自治系统来说, 其内部负荷主要依赖分布式电源与储能装置供电, 且微网的转动惯量非常小, 导致 DG 的接入位置与容量会对微网的稳定运行产生很大的影响。

当前研究中, 学者对于分布式电源在配电网与微网中的选址定容配置并未结合两种应用场合加以区分。从某些程度上说, 微网依托于配电网而存在, 靠近用户端, 其所有权可属于电力公司也可属于用户, 微网内分布式电源的选址与定容可以在某些方面借鉴配电网方法, 但不能简单照搬使用。

微网的运行方式有两种: 并网运行与孤岛运行。因此在考虑 DG 的选址定容时, 也应从这两方面进行考虑。针对微网 DG 的选址定容, 部分学者进行了相关研究。分布式电源在并网与孤岛的运行情况下, 考虑的因素略有不同。文献[20-25]研究了并网运行下分布式电源的选址定容。除了考虑在孤岛运行方式下的经济性因素外, 还重点考虑了微网与大电网之间电能交换的成本与收益, 以及储能装置担负削峰填谷任务的收益。文献[26]提出了上层优化

规划、下层优化控制的双层微网系统规划设计方法,能够同时完成并网型和离网型微网的 DG 接入容量的规划设计,但未涉及 DG 的选址方面的研究。随着当前微网规划研究热点逐步转移到偏远地区或海岛地区应用的背景下,文献[27-31]研究了在长期孤岛(离网)运行方式下 DG 在微网中的选址定容。考虑的电源组合通常为风光柴蓄,涉及的经济因素主要包括网损与经济成本,其成本主要包括了投资成本、运维成本、燃料成本、环保成本等。文献[32]采用了滤波算法考虑了微型燃机与储能的优化调度组合;文献[33]针对典型带海水淡化负荷的风光柴储互补独立微网,提出了考虑全寿命周期净费用、可再生能源利用率以及污染物排放水平的多目标优化设计模型;文献[34]在文献[33]的基础上考虑了可时移负荷的影响。

同时,也有部分学者将微网与配电网规划综合起来考虑,文献[34]在微网内部 DG 选址定容研究中,将整个微网对配电网的供电可靠性的支撑作为一个优化目标。文献[35-37]将微网与输电线路统一进行拓展规划;文献[38]综合考虑高渗透率微网接入对配电网的经济性和稳定性影响,以系统收益最大化和电压偏差最小化为优化目标,提出了一种新型的用户侧微网高渗透率接入配电网的选址定容配置方法。文献[39]直接将配电网中的部分分布式电源的接入进行动态规划,以构建边界动态调整的微网,提升配电网的自愈能力。这与前文的主动配电网的故障后重构运行具有一定的相似性。

在优化算法的考虑方面,通常采用的都是人工智能算法,比如细菌觅食算法^[22]、改进遗传算法^[32,40-41]、自由搜索算法^[34]、粒子群算法^[42-45]。

当前文献在进行分布式电源选址定容时考虑了经济性因素与可靠性因素,但是对于分布式电源的自身固有特性考虑不足,不能充分发挥分布式电源的特点,以达到优化经济效益的目的。在储能装置建模时,通常直接简化为蓄电池模型,忽略其他储能装置实际运行特点,如飞轮储能,电磁储能等;在充放电策略建模时,未充分考虑储能装置与分布式电源的合理配合,等等。因此,在后续的研究中应充分考虑这些因素,以获得最大的经济收益。

4 DG 选址定容在配电网与微网中的比较

目前对于分布式电源在配电网与微网中选址定容的思路大体相同,分两个阶段:首先,初步确定分布式电源的候选接入点或者直接指定接入点。根据国家能源政策,结合当地自然资源的分布情况(如风能,光能丰富地区)以及接入区域的选择要求,确

定分布式电源的初步接入位置。其次,依据分布式电源总装机容量不超过电网最大容量的 10%~25% 的原则,结合各自的特点,综合考虑多种因素,选取适当的求解算法,确定多目标优化的定容方案。

当前文献分析表明,经济性和可靠性的考虑依然是 DG 接入电网选址定容的一个主流的优化目标,与其应用场合(配电网或微网)的不同,不存在根本性差异。但优化目标在结合具体的应用场合、应用环境时,由于考虑因素侧重点的不同,最终体现为差异化的解决方案。主要表现在以下几个方面。

1) 优化目标侧重点不同

分布式电源作为配电网供电的一种有效补充,提高了配电线路的传输功率裕量和负荷的供电可靠性,但其负荷供电的主要来源依然为配电变压器侧电网。在负荷用户选择供电来源时,会重点考虑分布式电源发电电价与市电电价的可比性。因此,配电网内 DG 选址定容的首要目标为经济性因素。

而对于微网而言,其最初概念的提出源于定制电力、差异化供电的目的,其研究侧重点在于向用户提供不同等级的优质电能。故其供电可靠性的考虑是其首要考虑的目标,在此基础上兼顾经济性因素。故微网内 DG 的选址定容侧重于可靠性的保障方面。尤其对于长期孤岛运行的微网,由于缺少大电网的支撑,微网内分布式电源的优化组合和接入位置的设计,直接关系到微网运行的稳定性和供电的可靠性。

2) 运行方式对选址定容的影响不同

由于微网自身特点,其运行方式分为并网运行与孤岛运行。在并网运行条件下,当微网内的分布式电源容量出现冗余或缺额时,微网与大电网之间存在着电能交换;这在传统配电网中是不允许出现的。因此,除了通常配电网需要考虑的因素以外,对于并网型微网的选址定容,需要将电能交换这一因素着重考虑。而对于长期离网型微网,分布式电源通常集中接入一条或几条母线,规划过程对于设备类型和容量等因素的考虑更多。

3) 储能装置接入比例和接入位置的不同

由于微网是依托于分布式电源而存在,而分布式电源具有很强的随机性、间歇性,为了保证能够平滑的供电,减小对电网的冲击,维持微网运行的稳定性,需要在微网中引入储能装置。相对自身电源容量而言,微网内含有大量分布式储能装置,其中以蓄电池、飞轮储能、超级电容器为代表;鉴于储能装置价格较高,因此在考虑分布式电源的选址定容时,应将储能装置的合理配置作为一个独立的因素予以考虑。

而对于配电网来说, 分布式电源的接入, 加大了运维人员的工作难度, 除了传统运行方式的调节外, 更应该借助于集中储能系统灵活的功率输出^[25], 平滑调节分布式电源的功率输出, 优化网络运行状况, 改善电能质量。配电网内接入的集中储能系统通常以抽水蓄能电站、压缩空气储能电站为代表, 由于其接入位置与资源分布紧密相关, 故无法实现储能的任意接入, 只能优化其运行、调度。

表 2 配电网与微网典型的 DG 选址定容方法比较

Table 2 Comparison of DGs' locating and sizing problems between in distribution network and in micro-grids

	运行方式	决策变量	目标函数	优化方法	约束条件
配电网	并网	分布式电源接入位置与接入容量	网络的建设投资/运行总成本, 供电可靠性。	① 以遗传算法, 粒子群算法为代表人工智能算法; ② 以目标逼近和二次序列法为代表的数学解析法。	① 配电网功率平衡约束; ② 分布式电源单个容量与接入总容量约束; ③ 节点电压与线路传输容量约束。
微网	离网	除了传统的接入位置与容量外, 增加考虑电源类型和其余实际工程因素的影响, 比如光伏板的倾斜角, 风力发电机的塔架高度。	建设、运维、燃料与设备更换等经济性指标、温室气体排放、绿色能源使用率、供电可靠性等技术性指标。	① 应用微网规划设计软件, HOMER 和 DER-CAM; ② 以遗传算法, 粒子群算法为代表的智能算法; ③ 以不确定性规划模型的求解方法。	除了功率平衡与电源自身的限制约束外, 增加下列约束: ① 储能容量限制和充放电速度; ② 系统的可靠性; ③ 电网联络线功率变化。
	并网	除了离网型考虑的因素以外, 增加了联络开关与传输线路的定位。	兼顾并网购电成本/售电收益		

5 DG 选址定容差异化发展的思考

从前文的评述可以看出, 对于分布式电源在配电网与微网中选址定容的问题的研究已经取得了大量成果。但仍有几点需要进一步探讨, 进而服务于实际工程。

1) 优化目标最终达成度的差异

如前文所言, 微网的优化目标在于提供定制化电力服务, 侧重于供电可靠性目标, 兼顾经济性指标。同时, 微网主要应用于新建小区或工业园区。新建小区的线路建设、设备采购均可按照可靠性最优的目标去配置, 反过来, 使得在选址定容求解过程中按照全局最优进行求解即可。

而配电网的应用场合通常位于人口较密集地区, 其负荷分布已经固定, 故其只能采用有限的线路改造手段。这就决定其对于分布式电源选址定容最优解的实际实施存在困难, 只能获得次优解。

对于供电可靠性要求高的, 可以配置大量的分散型储能或分散的电动汽车充放电接口, 导致这类优化问题经济性因素次之, 需要获得可靠性方面的最优解。且在实际工程中, 由于为新建项目, 其布局施工均可以达到最优。

2) 设备精细化建模要求不同

因此, 虽然微网和配电网中 DG 在选址定容时均应计及储能的配置, 但储能形式不同(分布式/集中式)、接入位置、单位容量成本等因素会极大影响优化方案的设计和实现。

分布式电源的选址定容在配电网与微网中的运行方式、决策变量、目标函数、优化方法以及约束条件的比较如表 2 所示。

对于微网, 其内部除了常规 DG 和负荷之外, 还有分布型储能和分散的电动汽车充放电接口。而其转动惯量小, 抗扰动的能力较差, 为了实现定制化电力的目标, 需要对内部接入的设备特性进行尽可能精细化的建模, 从而使得设备接入运行后, 扰动尽可能的小, 保障其运行的稳定性。

而对于配电网, 随着大量 DG、电动汽车、可控负荷的接入, 由于存在海量数据传输的通信压力, 配电网不可能将控制精细到每一个独立的个体部件, 其未来面对的应该是以虚拟电厂技术、微网技术为代表的中间代理单元和集中充电站/换电站、智能用户变电站为代表的实体单元的整体接入。故对这类容量达到一定规模的 DG 集群代理单元或电站实体单元的外在特性的建模非常重要, 直接影响这类单元在配电网区域中的选址定容的最终结果。

3) 配电网自身调整能力的考虑

随着“源-网-荷”互动技术的发展, 目前研究的热点依然在“源”和“荷”两端, 而“网”作为两端的中间连接亦起着至关重要的作用。配电网或微网中线路拓扑调节(分段开关、联络开关)、变压器分抽头调节、补偿设备调节等技术手段的应用, 会严重影响 DG 在网中的选址定容的最终结果。

6 结论

分布式电源的选址定容是配电网与微网优化经济运行的重要方面,对配电网与微网的发展具有重要意义。本文在总结分布式电源的选址定容方法的基础之上,对该领域内国内外的研究成果进行了较为全面的分析,指出了各类方法的优缺点,详细分析了分布式电源选址定容问题在配电网与微网中的异同点,并对优化目标的达成度、参与设备的精细化建模、电网调节能力的影响等3个方面,提出了自己的看法,以此为该方向后续发展提供参考。

参考文献

- [1] 季阳, 艾芊, 解大. 分布式发电技术与智能电网技术的协同发展趋势[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 15-23.
JI Yang, AI Qian, XIE Da. Research on co-developmental trend of distributed generation and smart grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 15-23.
- [2] 马钊, 梁惠施, 苏剑. 主动配电系统规划和运行中的重要问题[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1499-1503.
MA Zhao, LIANG Huishi, SU Jian. Important issues in planning and operation of active distribution system[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1499-1503.
- [3] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103-5111.
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5103-5111.
- [4] LASSETER B. Microgrids[C] // Proceedings of 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting: Vol 1, Jan 28-Feb 1, 2001, Columbus, OH, USA. Piscataway, NJ, USA, IEEE, 2001: 146-149.
- [5] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38-43.
WANG Chengshan, CHEN Kai, XIE Yinghua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43.
- [6] WANG Caisheng, NEHRIR M H. Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 2068-2076.
- [7] 郑漳华, 艾芊, 顾承红, 等. 考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 23-28.
ZHENG Zhanghua, AI Qian, GU Chenghong, et al. Multi-objective allocation of distributed generation considering environmental factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 23-28.
- [8] 刘波, 张焰, 杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 103-108.
LIU Bo, ZHANG Yan, YANG Na. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 103-108.
- [9] 潘超, 焦薇羽, 孟涛, 等. 基于混合智能粒子群算法的广义电源主动配电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 69-75.
PAN Chao, JIAO Weiyu, MENG Tao, et al. Optimal allocation of generalized power sources in active distribution network based on hybrid intelligent particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 69-75.
- [10] CELLI G, PILO F. Optimal distributed generation allocation in MV distribution networks[C] // 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Power Industry Computer Applications, 20-24 May, 2001: 81-86.
- [11] GRIFFIN T, TOMSOVIC K, SECREST D. Placement of dispersed generation system for reduced losses[C] // Proceeding of the 33rd Hawaii Conference on system Sciences, Maui (HI, USA), 2000: 1446-1454.
- [12] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [13] 赵国波, 刘天琪, 李兴源. 分布式发电作为备用电源的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 85-89.
ZHAO Guobo, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Optimal deployment of distributed generation as backup generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 85-89.
- [14] 彭显刚, 林利祥, 刘艺, 等. 计及电动汽车和可再生能源不确定因素的多目标分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2188-2194.
PENG Xiangang, LIN Lixiang, LIU Yi, et al. Multi-objective optimal allocation of distributed generation considering uncertainties of plug-in electric vehicles and renewable energy sources[J]. Power System Technology,

- 2015, 39(8): 2188-2194.
- [15] 白晓清, 吴雪颖, 李佩杰, 等. 计及电压稳定裕度的配电网光伏发电选址与定容[J]. 现代电力, 2015, 32(4): 34-41.
BAI Xiaoqing, WU Xueming, LI Peijie, et al. Location and sizing of photovoltaic power generations by considering voltage stability margin of distribution system[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(4): 34-41.
- [16] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 主动管理模式下分布式风电电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 208-214.
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Siting and sizing planning of distributed wind generators under active management mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 208-214.
- [17] 刘柏良, 黄学良, 李军, 等. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 450-456.
LIU Bailiang, HUANG Xueliang, LI Jun, et al. Multi-objective planning of distribution network containing distributed generation and electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 450-456.
- [18] 柳春芳. 主动配电网的一体化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 49-55.
LIU Chunfang. An integrated design method of active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 49-55.
- [19] GANDOMKAR M, VAKILIAN M, EHSAN M. A genetic based Tabu search algorithm for optimal DG allocation in distribution networks[J]. Electric Power Components and Systems, 2005, 33: 1351-1362.
- [20] 林珊. 微电网中分布式电源最优容量组合研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
LIN Shan. Research on the optimal sizing combination of distributed generation in microgrids[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [21] MIZANI S, YAZDANI A. Optimal design and operation of a grid-connected micro-grid[C] // IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2009: 1-6.
- [22] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25.
MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 17-25.
- [23] 伍言, 刘俊勇, 刘友波, 等. 基于负荷组合与光伏电源匹配算法的微电网配置[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 51-55.
WU Yan, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Microgrid configuration based on matching algorithm between load combination and photovoltaic DG[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 51-55.
- [24] MORADI M H, ESKANDARI M, SHOWKATI H. A hybrid method for simultaneous optimization of DG capacity and operational strategy in microgrids utilizing renewable energy resources[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 56: 241-258.
- [25] ARDAKANI F J, RIAHY G, ABEDI M. Optimal sizing of a grid-connected hybrid system for North-West of Iran-case study[C] // Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2010 9th International Conference on. Prague, Czech Republic: IEEE, 2010: 29-32.
- [26] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 124-133.
LIU Zhenguo, HU Yaping, CHEN Jiongcong, et al. A planning and design method for microgrid based on two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 124-133.
- [27] 江全元, 石庆均, 李兴鹏, 等. 风光储独立供电系统电源优化配置[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 19-26.
JIANG Quanyuan, SHI Qingjun, LI Xingpeng, et al. Optimal configuration of standalone wind-solar-storage power supply system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 19-26.
- [28] 郭力, 刘文建, 焦冰琦, 等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 524-536.
GUO Li, LIU Wenjian, JIAO Bingqi, et al. Multi-objective optimal planning design method for stand-alone microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 524-536.
- [29] BELMILI H, HADDADI M, BACHA S, et al. Sizing stand-alone photovoltaic-wind hybrid system: techno-economic analysis and optimization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 30: 821-832.
- [30] YANG H, ZHOU W, LU L, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm[J]. Solar Energy, 2008, 82(4): 354-367.
- [31] 陈健, 王成山, 赵波, 等. 考虑不同控制策略的独立型微电网优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 1-6.

- CHEN Jian, WANG Chengshan, ZHAO Bo, et al. Optimal sizing for stand-alone microgrid considering different control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 1-6.
- [32] 肖峻, 梁海深, 王旭东, 等. 基于滤波的孤立微网多目标规划设计方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 596-602.
XIAO Jun, LIANG Haishen, WANG Xudong, et al. Multiple objective planning and designing of island microgrid based on filtering[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 596-602.
- [33] 刘梦璇, 王成山, 郭力, 等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 34-39.
LIU Mengxuan, WANG Chengshan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 34-39.
- [34] 刘柏良, 黄学良, 李军. 计及及时移负荷的海岛微网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4250-4258.
LIU Bailiang, HUANG Xueliang, LI Jun. Optimal sizing of distributed generation in a typical island microgrid with time-shifting load[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4250-4258.
- [35] AREFIFAR S A, MOHAMED Y, EL-FOULY T H. Optimum microgrid design for enhancing reliability and supply-security[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1567-1575.
- [36] HE Y, SHARMA R. Microgrid generation expansion planning using agent-based simulation[C] // Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2013 IEEE PES. Washington, DC, USA: IEEE, 2013: 1-6.
- [37] KHODAEI A, SHAHIDEHPOUR M. Microgrid-based co-optimization of generation and transmission planning in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1582-1590.
- [38] 魏文潇, 于力, 马溪原, 等. 用户侧微电网高渗透率接入配电网的优化配置方法[J]. 南方电网技术, 2015, 9(4): 7-13.
WEI Wenxiao, YU Li, MA Xiyuan, et al. Optimal allocation of user-side microgrid embedded into distribution network under high penetration[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(4): 7-13.
- [39] KIRTHIGA M V, DANIEL S A, GURUNATHAN S. A methodology for transforming an existing distribution network into a sustainable autonomous micro-grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 31-41.
- [40] CHEN H. Optimum capacity determination of stand-alone hybrid generation system considering cost and reliability[J]. Applied Energy, 2013, 103: 155-164.
- [41] ABBES D, MARTINEZ A, CHAMPENOIS G. Life cycle cost, embodied energy and loss of power supply probability for the optimal design of hybrid power systems[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2014, 98: 46-62.
- [42] PALIWAL P, PATIDAR N P, NEMA R K. Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using particle swarm optimization[J]. Renewable Energy, 2014, 63: 194-204.
- [43] BAHRAMIRAD S, REDER W, KHODAEI A. Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2056-2062.
- [44] CHEN S X, GOOI H B, WANG M. Sizing of energy storage for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 142-151.
- [45] KAMJOO A, MAHERI A, PUTRUS G A. Chance constrained programming using non-Gaussian joint distribution function in design of standalone hybrid renewable energy systems[J]. Energy, 2014, 66: 677-688.

收稿日期: 2016-03-19; 修回日期: 2016-08-19

作者简介:

李军(1979-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为配电网运行优化; E-mail: lijun98313@163.com

颜辉(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为主动配电网运行优化; E-mail: yh320381@163.com

张仰飞(1970-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制, 新能源发电及利用。E-mail: zhangyf@njit.edu.cn

(编辑 姜新丽)