

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191351

## 泛在电力物联网形势下的主动配电网规划技术综述

肖振锋<sup>1</sup>, 辛培哲<sup>2</sup>, 刘志刚<sup>1</sup>, 王逸超<sup>1</sup>, 邓凯<sup>1</sup>, 崔戎舰<sup>3</sup>, 侯慧<sup>3</sup>, 邓翔天<sup>3</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410005; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102299; 3. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 泛在电力物联网鼓励各种分布式电源、储能以及电动汽车等大量的新型电力设备接入配电网侧。传统的配电网结构在未来将会出现巨大变化, 导致原有的规划技术将难以适用于配电网对于供电安全性与稳定性等指标的要求。基于以上现状, 对适用于泛在电力物联网形势下的主动配电网规划技术进行综述。分别从主动配电网中负荷预测与发电预测、选址定容、规划方案多维度评估等方面, 阐述了新形势下配电网规划技术可能遇见的难点与挑战, 归纳评价了多种复杂理论与优化算法。最后给出了对于新形势下主动配电网规划技术的总结与未来展望。

**关键词:** 泛在电力物联网; 主动配电网; 规划技术; 分布式电源; 储能; 电动汽车

### An overview of planning technology for active distribution network under the situation of ubiquitous power internet of things

XIAO Zhenfeng<sup>1</sup>, XIN Peizhe<sup>2</sup>, LIU Zhigang<sup>1</sup>, WANG Yichao<sup>1</sup>, DENG Kai<sup>1</sup>, CUI Rongjian<sup>3</sup>, HOU Hui<sup>3</sup>, DENG Xiangtian<sup>3</sup>  
(1. Research Institute of Economics and Technology of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410005, China;

2. State Grid Research Institute of Economics and Technology Co., Ltd., Beijing 102299, China;

3. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** With the promotion of the ubiquitous power internet of things, there are more and more new power equipment connected to the distribution network, such as kinds of distributed generation, energy storage system, electric vehicles and so on. So the traditional distribution network will be greatly changed in the future, which makes it difficult for original planning technology to meet the requirements of the distribution network for power supply security and stability. So based on the above situation, the active distribution network planning technology is reviewed, which is applicable to the situation of ubiquitous power internet of things. And current research about load forecasting and generation forecasting, siting and sizing, and multi-dimensional evaluation of planning schemes in active distribution network are reviewed. It also puts forward some difficulties and challenges that the distribution network planning technology may encounter under the new situation, and summarizes and evaluates a variety of complex theories and optimization algorithms. Finally, the summary and the future prospect of active distribution network planning technology under the new situation are given.

This work is supported by National Natural Science Foundation for Young Scientists of China (No. 51707139), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. WUT: 191011005), and Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Company (No. 5216A018000J).

**Key words:** ubiquitous power internet of things; active distribution network; planning technology; distributed generation; energy storage system; electric vehicles

## 0 引言

近些年来, 随着化石能源的日渐枯竭与生态环

境的不断恶化, 人类社会的可持续发展受到了严重威胁。在这种大背景下, 分布式电源(Distributed Generation, DG)、储能(Energy Storage System, ESS)、电动汽车(Electric Vehicle, EV)等新型电力设备应运而生<sup>[1]</sup>。这些新型电力设备的接入, 不仅可缓解能源紧张的局势, 同时也会给传统的配电网带来巨大变革。

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金资助(51707139); 中央高校基本科研专项资金资助(WUT: 191011005); 国网湖南省电力公司科技项目资助(5216A018000J)

传统的配电网本质上是一种被动的配电网，我国过去电网的发展是以安全供电为重心的，其运行、控制和管理模式都是被动的<sup>[2]</sup>。由大型发电厂生产的电力，流经输电网，再通过配电网送到用户，其线路潮流多为单向。另外，即便采用配电自动化技术，其核心控制思路仍然是被动的，即在无故障的情况下，一般不会进行自动控制的操作。因此，作为电力系统末端的配电网，可以称之为被动配电网(Passive Distribution Network, PDN)。随着多种新型电力设备的接入以及需求侧的变化，配电网日益复杂。PDN已经无法满足当今社会对电力系统在稳定性、可靠性以及经济性等指标的性能要求，比如潮流双向流动引发源网双端不确定性；分布式能源的大量接入导致电能质量波动；分布式能源利用率低，导致弃风弃光现象严重等<sup>[3]</sup>。

因此，国际大电网会议配电及分布式发电委员会成立了C6.11工作组，并于2008年首次提出了主动配电网(Active Distribution Network, ADN)的概念。它利用先进的电力电子技术、通信技术和自动控制技术，综合考虑上级网络，DG、ESS与EV等新型电力设备，并对其进行协调控制，实现对配电网的主动管理，是未来配电网的发展方向<sup>[4]</sup>。此外，国家电网公司于2019年提出要将建设泛在电力物联网作为未来的工作重心，充分应用“大、云、物、移、智”等现代信息技术，实现电力系统状态全面感知与信息高效处理，建立包含感知层、网络层、平台层、应用层这四层结构的智慧服务系统<sup>[5]</sup>。在这一形势下，ADN被赋予了更大的价值空间，类似负荷增加与波动等问题不再需要通过供电侧来解决。通过灵活的拓扑结构、先进的计量装置以及主动的管理模式，大量的DG、ESS与EV等新型电力设备同样可以参与到配电网调节中，再加以合理规划，从而达到经济环保、电力安全性和可靠性以及满足用户的多样化需求等多方面的目标。

不同于PDN“发输配”分离的传统三元结构，泛在电力物联网新形势下的ADN在规划中需要在开放的电力市场环境下，考虑具有随机性的风光出力等变量、具有复杂性的需求侧资源等约束条件以及具有多元化的经济技术环保等目标函数。上述因素极大地影响了配电网在规划过程中寻优的速度与准确性。国内外不少科研工作者围绕着新形势下的ADN规划技术进行了深入的探索研究。本文将结合最新的研究成果，对新形势下的ADN规划技术研究进行系统分析与总结，大致可以分为三个层面：以负荷预测以及发电预测为核心的数据感知层；以各种优化理论为主导的目标规划层；以多维视角为

依托的评估决策层。最后展望了在泛在电力物联网新形势下ADN规划技术的未来发展方向。

## 1 数据感知层——负荷预测与发电预测

精准的负荷预测与发电预测是新形势下ADN规划的重要组成部分之一，对于电网规划的质量具有决定性影响。负荷预测是一种基于系统运行特性、自然条件与社会影响等诸多因素影响下，根据负荷过去值以及现在值来确定未来某特定时刻的负荷数据的方法。在PDN中，负荷种类相对单一，不确定因素较少。但随着泛在物联网的深入拓展，各种新型电力设备与需求侧响应等技术的加入增加了负荷预测的不确定度。另外，因电力系统结构特性所致，PDN作为一种无源网络，不需要考虑发电预测。然而ADN引入了多种DG，为了更好地对配电网进行规划与配置，则必须对其发电量进行预测。

### 1.1 负荷预测

负荷预测方法大致可以分为经典预测法和现代预测法。经典预测法包括：趋势外推法、时间序列法以及回归分析法等<sup>[6]</sup>。这类方法利用多种简单常见的数据统计方法，对地区用电量等信息进行分析。通过对过去的负荷数据进行数学建模与预测分析，意图确定未来电力负荷的基本特征与变化规律。但此类方法对于样本的需求量过大，并且要求数据具有良好的分布规律。对于泛在电力物联网背景下经常出现的EV等电力设备，因其具有随机性特征的电力数据，经典预测法无法很好地展开分析。

随着基础理论的发展和学科之间的交叉，如灰色数学预测法、神经网络预测法、模糊负荷预测法等现代预测法在这种新形势下得到成功运用<sup>[7-8]</sup>。灰色数学预测法是将负荷序列视为众多影响因子综合作用的结果，这些因子的未知性与不确定性构成了负荷的灰色特性，通过变化将序列变化为有规律的数列再建模分析。神经网络预测法利用了神经网络的学习功能，具有强大的自我学习能力与记忆功能。模糊负荷预测法通过构建隶属度函数来分析非线性系统，从而将复杂抽象的问题具体化。上述方法均有一定的参考价值，但也存在一些不足。文献[9]提出一种基于数据融合的支持向量机精细化负荷预测方法，首先对负荷历史数据进行聚类分析，再将负荷数据和温度、湿度等天气数据进行融合，大大提高了预测精度。

### 1.2 发电预测

光伏发电与风力发电作为新形势下ADN中DG的重要成分，具有极大的不确定性，例如光照强度、温度与湿度等因素均会影响光伏发电的出力，风速

会影响风力发电的出力。但是这些因素都会随着时间、天气等情况随机变化,为了研究这类不确定性问题,学术界采用多种数学模型来描述,比如 Weibull 分布模型<sup>[10]</sup>、Beta 分布模型<sup>[11]</sup>、LogNormal 分布模型<sup>[12]</sup>等,前两者应用最为广泛。

但上述数学模型只能折射出光伏发电与风力发电的通用属性,面对气候日益多变的当下,这些模型是否具有代表性,十分有待商榷。文献[13]综述了美国风能和太阳能预测技术的最新发展趋势,指出美国能源局与美国国家海洋和大气管理局已经共同开发了依据实时天气预报的 DG 发电预测系统,通过运用多种人工智能方法,可将 ADN 发电量预测在新形势下产生的不确定降到最低。

## 2 目标规划层——选址定容

在泛在电力物联网这一背景下,对 ADN 的合理规划,可以大大提高 DG 等设备的接纳能力、减少对网架以及各种电力设备的升级投资。通过多能源多系统之间的协同互补,减少弃风弃光等现象,实现 ADN 的最优化运行以及能源的可持续发展。国内外学者对 ADN 的选址定容领域进行了大量研究,从而对主动配电网中 DG、ESS 以及 EV 所需的充电站等进行选址定容。“选址”即合理选择 DG 等设备的接入位置,“定容”即合理确定 DG 等设备的接入容量与数量,对系统电能质量与供电可靠性等方面的提升起到了重要作用。

### 2.1 考虑 DG、ESS 与 EV

DG、ESS 以及 EV 所需充电站的选址定容问题属于非线性、多约束、多目标的优化问题,其求解方法主要有传统经典数学优化算法以及启发式优化算法等<sup>[14]</sup>。在泛在电力物联网背景下,不同的地区在不同的时间段内对于电网也有着不一样的需求。

DG 灵活接入配电网,能有效提高 ADN 的各项指标。文献[15-16]分别从 DG 可接入容量最大和系统网损最小这两个单层面对 DG 选址定容问题进行优化。文献[17]从经济效益和规划所面临问题这两个层面出发,对含 DG 的 ADN 规划技术进行阐述。文献[18]提出一种考虑供电公司利润最大化的规划模型,该模型将 DG 按照发电属性进行了分类,通过对它们在运行中所产生的成本与利润等数据进行分析,得出 DG 的最佳安装位置与容量。文献[19]则针对 DG 的不确定性和间歇性,分析了 DG 的时序特性,并建立了一种基于多场景技术的双层协调规划模型,实现规划方案综合最优性。

ESS 在 ADN 中主要应用于:平抑风光波动、削峰填谷、提高电能质量以及提升系统稳定性等<sup>[20-21]</sup>。

为了达到上述应用效果,ESS 必须进行优化配置。文献[20]将 DG 的选址定容分为选址和定容两个阶段进行规划,另外还考虑了 ESS 对于 DG 出力不确定性的影响,进行了协同规划。文献[21]也考虑到 ESS 在削弱 DG 出力不稳定性的弊端,采用最小化的成本目标条件来最优规划确定 ESS 的位置、容量和额定功率。文献[22]指出 ESS 的优化配置是配电网规划的关键,针对泛在电力物联网形势下可能出现的多种 DG 与各类负载并网出现的场景进行 ADN 双层规划。

EV 充电站作为电动汽车充电的站点,能较好地解决 EV 快速充电等问题,实现节能减排以及电能的高效利用。在新形势下的 ADN 规划研究中,如何确定电动汽车充电基础设施与风光互补系统的容量配比,是目前尚未解决的问题,值得探讨。文献[23]在考虑 EV 用电需求与储能能力的前提下,以系统投资成本、运行成本和电量不足损失成本综合最低为目标构建规划模型,并运用微分进化算法验证了模型的正确性。此外,住宅区内以及公共区域也适合规划部署 EV 充电桩,文献[24]考虑电动汽车分布不平衡的充电需求、充电距离等方面,对该类型区域的 EV 充电桩进行选址定容,使得 ADN 的规划方案更加贴近 EV 的充电需求。

### 2.2 考虑主动管理技术

在 PDN 中输电网可以通过控制机组来保证负荷需求,是具有主动控制性质的网络。但 PDN 中配电网侧只起到了将电能配送到用户端的作用,无法实现对电能的主动控制与管理。而 ADN 的关键技术是主动管理技术,恰好可以在对配电网的运行参数进行有效测量的基础上实现对 DG、ESS 以及 EV 等多种新型电力设备优化控制。文献[25]将主动管理技术分为主动潮流管理、主动电压调整以及需求侧管理等。其中潮流管理是通过潮流参数的测量值来控制 DG 出力,进而控制潮流;主动电压调整是通过控制 DG 的有功与无功出力等方法来控制系统电压;需求侧管理是通过改变用户的用电方式以及控制负荷等方式来对负荷进行削峰填谷。

所以在对 ADN 进行规划时,要尽可能考虑到主动管理技术的应用。文献[26]提出了基于 ADN 扩展规划的总投资与运行费用最小的混合整数二阶锥规划模型,考虑了四种主动管理技术(有载调压、切机、切负荷与无功补偿)来降低规划成本与未来运行风险。文献[27]将主动管理技术作为双层规划的下层核心内容,下层模型综合考虑各时段 ADN 运行优化来确定主动管理模式,是一种短期优化。而上层模型侧重长期规划,以 ADN 年综合经济成本最

优为目标函数对 DG 进行选址定容, 是一种在主动管理技术下计及时序性与相关性的规划与运行相结合的双层优化模型。

### 3 评估决策层——规划方案多维度评估

在泛在电力物联网新形势下, ADN 可以实现海量数据实时感知以及多种新型电力设备等动态规划。同时快速对规划方案进行多维度评估与选择, 也是 ADN 规划技术中至关重要的一环。

#### 3.1 供电能力评估

供电能力展现了 ADN 对负荷增长需求的适应能力。在 ADN 中, 传统电源与 DG 可以互为备用电源, 需求侧管理技术可以对可控负荷进行调节, 最终提高配电网的供电能力。文献[28]认为 ADN 的供电能力可以从 DG 最大允许渗透率、可控负荷比例等多方面来评估。文献[29]首先对 ADN 中不确定因素进行建模, 再基于场景生成与缩减技术形成供电能力评估的多场景, 最后制定多种供电能力评估指标对其进行评估。文献[30]新增“供电能力合格率”与“供电峰谷差下降率”两项指标, 用来评估配电网的供电能力。文献[31]认为供电能力是评价配电网可靠性的重要指标, 在考虑不同类型的日负荷曲线的基础上, 将配电网  $N-1$  原则作为前提约束, 借助网络重构来计算系统的最大供电能力。

#### 3.2 经济效益评估

在 PDN 的经济性评估中, 考虑的因素大多只限于发电成本、购电成本与建设成本, 有时还包括环境效益等。而随着目前能源结构多元化的发展, DG、ESS 与 EV 等已经在配电网中得到了大规模的应用, 它们能极大提高能源利用效率, 减少环境污染。对此, 有必要引入新的经济性评估机制来对 ADN 进行评估。文献[32]提出要在 DG 发电成本与传统火力发电成本中考虑环境成本, 环境成本是企业为了等值补偿发电带来的污染经济损失所付出的代价, 传统发电方式对于环境的污染十分严重, 而 DG 发电所造成的污染物几乎为 0。由于 ADN 允许其他运营商进入配电网侧进行投资, 打破了电网公司垄断经营的局面。所以对 ADN 进行经济评估的对象不仅包括电网公司, 还包括区域运营商与用户等。文献[33]提出了一种基于需求侧响应下 ADN 中运营、用户、社会以及电网公司等主体的成本效益评估技术, 为 ADN 的经济性评估提供了理论依据。

#### 3.3 安全性能评估

配电网在发生故障后, 可能会导致设备过载、电压越限与失负荷等, 威胁配电网安全运行, 所以有必要对 ADN 的风险性进行全面评估, 找出系统

运行的薄弱环节。传统的潮流算法、蒙特卡洛分析法应用于 ADN 的风险评估中, 会因为新型电力设备接入而带来的不确定性因素, 导致运算困难和耗时激增等问题。文献[34]考虑 ADN 运行状态的时变性、随机性与模糊性, 均运用复杂网络理论来建立一套具备运行风险分析、评估与预警的体系。但利用复杂网络理论方法在风险的定性分析上仍不够完善。文献[36]提出基于时序特性的 ADN 中  $N-1$  支路故障的静态安全分析方法, 制定了负荷安全供电率、时段安全性、支路薄弱性以及系统综合安全性等指标来定量评估不同时段、不同支路和系统总体的风险。

## 4 总结与展望

### 4.1 总结

基于泛在电力物联网的新形势下, 本文从考虑 DG、ESS 与 EV 的 ADN 规划技术出发, 分别从新形势下 ADN 规划技术的数据感知层、目标规划层以及评估决策层这三个方面进行综述, 得到以下主要结论:

(1) 新形势下的 ADN 强调一种“万物互联”的状态, 新式电力设备将层出不穷, 如何正确有效地对其进行数学建模与统一管理, 成为一个亟待解决的疑难问题。

(2) 目前 ADN 目标规划层中所涉及的目标函数与算法不胜枚举, 所应用的具体场景也数不胜数, 应针对不同场景挖掘场景内各类资源的内在技术特性与规律关系, 采用最合适的目标函数与算法对其进行分析与规划。

(3) 新形势下大数据、云计算以及物联网等先进信息技术, 能有效保障 ADN 规划方案可靠有效, 也能在促进电力系统低碳清洁化的同时, 降低能耗与运维成本, 更好满足用户的用能需求。

### 4.2 展望

当前我国正处于泛在电力物联网建设与社会转型的关键时期, 新能源、新设备以及新业务不断接入配电网。在这种背景下, 未来的 ADN 规划应当满足以下条件:

(1) 充分利用新形势下所倡导的物联网与大数据分析技术, 构建完备的电网参数以及气象信息等参数的测量体系, 加强信息的全面获取与感知。

(2) 结合云平台等理念, 构建完善的 ADN 规划的目标函数与求解算法云知识库, 从而为提供最合适的 ADN 规划解决方案。

(3) 规划方案应鼓励大规模的可再生能源发电设备与电动汽车等新式负荷接入, 通过综合规划与

主动管理的方式使得电力系统成功转型。

### 参考文献

- [1] ERDINC O. Economic impacts of small-scale own generating and storage units, and electric vehicles under different demand response strategies for smart households[J]. *Applied Energy*, 2014, 126: 142-150.
- [2] 于琳. 主动配电网多目标规划及控制分区研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.  
YU Lin. Research on multi-objective planning and control partition of active distribution network[D]. Jilin: Shandong University, 2017.
- [3] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(18): 125-135.  
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(18): 125-135.
- [4] 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. Technology and its trends of active distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(18): 10-16.
- [5] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(14): 4015-4025.  
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous Internet of things in electricity: technical principles and typical applications[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(14): 4015-4025.
- [6] 刘云, 张杭, 张爱民. 需求侧响应下基于负荷特性的改进短期负荷预测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(13): 126-133.  
LIU Yun, ZHANG Hang, ZHANG Aimin. Improved load forecasting method based on load characteristics under demand-side response[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(13): 126-133.
- [7] LI Bowen, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Short-term load-forecasting method based on wavelet decomposition with second-order gray neural network model combined with ADF test[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 16324-16331.
- [8] DENG Z, WANG B, XU Y, et al. Multi-scale convolutional neural network with time-cognition for multi-step short-term load forecasting[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 88058-88071.
- [9] 席雅雯, 吴俊勇, 石琛, 等. 融合历史数据和实时影响因素的精细化负荷预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(1): 80-87.  
XI Yawen, WU Junyong, SHI Chen, et al. A refined load forecasting based on historical data and real-time influencing factors[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(1): 80-87.
- [10] ARIAS R A, MEJIA G R. Optimization of V-trough photovoltaic concentrators through genetic algorithms with heuristics based on Weibull distributions[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 122-140.
- [11] 杨宏, 苑津莎, 张铁峰. 一种基于 Beta 分布的风电功率预测误差最小概率区间的模型和算法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(9): 2135-2142.  
YANG Hong, YUAN Jinsha, ZHANG Tiefeng. A model and algorithm for minimum probability interval of wind power forecast errors based on beta distribution[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(9): 2135-2142.
- [12] LO B V, ORIOLI A, CIULLA G. Quality of wind speed fitting distributions for the urban area of Palermo, Italy[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(3): 1026-1039.
- [13] KIRSTEN D O, MARK L A, VENKAT B, et al. Recent trends in variable generation forecasting and its value to the power system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(3): 924-933.
- [14] 芦火青. 计及电能质量的分布式电源选址定容优化配置研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.  
LU Huoqing. Study of distribution generation locating and sizing optimal allocation considering power quality[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [15] 苏小玲, 韩民晓, 赵正奎, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量分析[J]. *电网技术*, 2012, 36(10): 87-92.  
SU Xiaoling, HAN Minxiao, ZHAO Zhengkui, et al. Research on maximum capacity of grid-connected distributed generation in distribution network[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(10): 87-92.
- [16] 文升, 顾洁, 程浩忠, 等. 分布式电源的准入容量与优化布置的实用方法[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(10): 109-114.  
WEN Sheng, GU Jie, CHENG Haozhong, et al. Maximum penetration level and optimal placement of distributed generation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(10): 109-114.
- [17] ALMOATAZ Y A, YASSER G H, WALID E, et al. Optimal planning of distributed generators in distribution networks using modified firefly method[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2015, 43(3): 320-333.
- [18] LESIBA M, ZHANG J, LI H, et al. Optimal location and capacity planning for distributed generation with independent power production and self-generation[J]. *Applied Energy*, 2017, 188: 140-15.
- [19] GAO Y, HU X, YANG W, et al. Multi-objective bilevel coordinated planning of distributed generation and distribution network frame based on multiscenario technique considering timing characteristics[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(4): 1415-1429.
- [20] LI Y, FENG B, LI G, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution networks considering integration of energy storage[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 1073-1081.
- [21] MAHDI S, ALI A, MASOUND A G. Optimal storage planning in active distribution network considering

- uncertainty of wind power distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 304-316.
- [22] LI J, XUE Y, TIAN L. Research on optimal configuration strategy of energy storage capacity in grid-connected microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 389-396. DOI: 10.1186/s41601-017-0067-8.
- [23] 张颖达, 刘念, 张建华, 等. 含电动汽车充电站的风光互补系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 126-134.  
ZHANG Yingda, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Optimum sizing of a stand-alone hybrid PV/wind generation system integrated with electric vehicle charging stations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 126-134.
- [24] 段庆, 孙云莲, 张笑迪, 等. 电动汽车充电桩选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 88-93.  
DUAN Qing, SUN Yunlian, ZHANG Xiaodi, et al. Location and capacity planning of electric vehicles charging piles[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 88-93.
- [25] 陈亚林. 分布式发电接入配电网影响及其主动管理技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
CHEN Yalin. The impact study of distribution generation access to distribution grid and active management technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [26] 邢海军, 程浩忠, 杨镜非, 等. 考虑多种主动管理策略的配电网扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 70-76.  
XING Haijun, CHENG Haozhong, YANG Jingfei, et al. Distribution network expansion planning considering multiple active management strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 70-76.
- [27] 贾清泉, 赵美超, 孙玲玲, 等. 主动配电网中计及时序性与相关性的分布式光伏并网规划[J]. 中国电机工程学报, 2018, 36(6): 1719-1728.  
JIA Qingquan, ZHAO Meichao, SUN Lingling, et al. Planning for grid-connection of distributed PVs considering the sequential feature and correlation in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 36(6): 1719-1728.
- [28] 陈炜. 主动配电网规划方案综合评价研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.  
CHEN Wei. Research on comprehensive evaluation of active distribution network planning scheme[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016.
- [29] 高亚静, 朱静, 程华新, 等. 计及不确定性因素基于多场景的主动配电系统短期供电能力评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6076-6085.  
GAO Yajing, ZHU Jing, CHENG Huaxin, et al. Evaluation on the short-term power supply capacity of active distribution system based on multiple scenarios considering
- uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6076-6085.
- [30] 郭力萍, 张伟. 基于时序模型的含孤岛运行配电网供电能力评估[J]. 电测与仪表, 2017, 54(24): 110-116.  
GUO Liping, ZHANG Wei. Evaluation of power supply capability for distribution network with isolated island operation based time-series model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(24): 110-116.
- [31] CHEN K, WU W, ZHANG B, et al. A method to evaluate total supply capability of distribution systems considering network reconfiguration and daily load curves[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2096-2104.
- [32] LARA Y, PETRAKOPOULOU F, MOROSUK T, et al. An exergy-based study on the relationship between costs and environmental impacts in power plants[J]. Energy, 2017, 138: 920-928.
- [33] 陈炜, 李妍, 陈峰, 等. 计及主动技术的配电网经济效益分析[J]. 电气技术, 2017, 18(5): 6-11.  
CHEN Wei, LI Yan, CHEN Feng, et al. Economic benefits analysis of distribution network considering active technologies[J]. Electrical Engineering, 2017, 18(5): 6-11.
- [34] 王钰楠, 杨镜非, 何也帅, 等. 基于网络流转移分布因子的主动配电网运行风险评估及预警[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 35-41.  
WANG Yunan, YANG Jingfei, HE Yeshuai, et al. Operation risk assessment and early warning of active distribution network based on network-flow shift distribution factor[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 35-41.
- [35] 符杨, 廖剑波, 李振坤, 等. 考虑时序特性的主动配电网静态安全分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 64-70.  
FU Yang, LIAO Jianbo, LI Zhenkun, et al. Static security analysis of active distribution network considering time sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 64-70.

收稿日期: 2019-10-29; 修回日期: 2019-12-04

作者简介:

肖振锋(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网智能化及电力通信网络规划; E-mail: zf\_xiao@whu.edu.cn

辛培哲(1979—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电网智能化及电力通信网络规划; E-mail: xinpeizhe@chinasperi.sgcc.com.cn

侯慧(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统风险评估及能源互联网研究。E-mail: houhui@whut.edu.cn

(编辑 张爱琴)