



农村分布式可再生能源利用模式与应用

洪博文^{1,5}, 冯凯辉¹, 穆云飞², 董晓红², 梁毅³, 闫湖¹, 何永胜⁴

(1. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209; 2. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 3. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110015; 4. 国家电网有限公司, 北京 100031; 5. 国家电网有限公司能源互联网经济研究院, 北京 102209)

摘要: 在梳理分布式可再生能源的概念和特征的基础上, 结合分布式可再生能源发展存在的问题及农村应用情况, 提炼出农村分布式可再生能源的几种典型利用模式, 结合不同应用场景下的资源和需求特征, 对几种典型利用模式的基本特征、适用范围和应用条件展开深入剖析。最后, 结合农村分布式可再生能源典型案例, 提出适合于分布式可再生能源典型利用模式在中国农村推广应用的建议。

关键词: 分布式可再生能源; 利用模式; 应用场景; 生物天然气; 光伏扶贫

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201903096

伴随中国经济由高速度向高质量的阶段性转变和可再生能源技术的快速发展, 中国农村能源的发展也出现了新思路和新契机^[1]。“本地取材、就近利用”的分布式能源凭借其简单、高效、灵活、可靠的供能优势, 近年来在能源供应体系中的比重和作用快速提升^[2-3]。2017年以来, 分布式可再生能源尤其是分布式光伏发电呈现快速发展势头, 分布式可再生能源系统的集成利用也成为新的发展趋势^[4]。与此同时, 对农村地区分布式可再生能源典型利用模式及适用性缺乏研究, 特别是一些跨能源行业甚至以能源为副产品的技术, 如农业废弃物和生活垃圾综合利用等, 并未得到研究者的充分重视和关注^[5-6]。

农村分布式可再生能源利用模式的研究不仅仅是如何通过技术组合和优化配置获得经济性的问题, 更重要的是如何与当地的资源禀赋和应用需求相结合, 设计和选择合理的分布式可再生能源利用模式, 充分挖掘应用潜力, 形成可复制、可推广的商业模式, 从而更好地发挥其经济、社会和环境价值。因此, 有必要在农村分布式可再生能源应用场景和利用模式之间建立更好的关联

关系。

因地制宜尽管一直被视为选择分布式可再生能源利用模式的重要原则, 但目前研究大多针对城市地区的办公楼^[7]、宾馆^[8]、机场^[9]等场景开展分布式可再生能源的技术经济和系统优化配置^[10-13], 以农村地区典型应用场景对分布式可再生能源应用需求和利用模式的研究和探讨较少。文献^[14]系统全面论述了农村能源的各类技术及应用现状, 但相关研究并未对农村能源典型利用模式进行经济性和适用场景的量化分析。文献^[15]建立一种分布式供能系统场景竞争力的分类评价模型, 并基于中国南方部分省区分布式供能系统的统计数据进行分析, 但未对不同区域分布式能源系统组合和利用模式的差异展开分析。文献^[16]选取中国 5 个不同典型气候区的城市建筑进行分布式能源优化设计和运行, 但未针对不同气候区分布式能源利用模式的差异展开研究和探讨。

通过梳理分布式可再生能源的概念和特征, 凝练了分布式可再生能源典型开发利用模式的特征、现状及问题, 研究和探讨了分布式可再生能源在农村地区的典型利用模式。针对实际典型项目案例进行模式和效益分析, 分析结果表明合理的分布式可再生能源利用模式兼具经济、社会和环境效益, 具有商业投资和推广应用价值。

收稿日期: 2019-03-26; **修回日期:** 2019-09-12。

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(分布式电源开发潜力评价及规模化发展阶段下管控和运营优化技术研究, 1400-201927279A-0-0-00)。



1 分布式可再生能源典型利用模式

中国城镇化正处于由高速度向高质量转变阶段，在城镇能源需求不断增加的同时，农村人口也在不断聚拢并逐步形成一些中心村，人均资源占有量和能源需求显著提升，为农村地区分布式可再生能源的发展提供了契机。随着城镇化推进和分布式可再生能源技术进步，分布式可再生能源在农村发展需求巨大。

城镇和农村作为发展分布式可再生能源的重点领域，其特征和条件并非截然不同，在分布式可再生能源开发和利用模式上也存在很多相同或相似之处。如生物质能利用既可以在农村开展，也可以在靠近农村的城镇周边开展。但综合考虑人口密度、生产生活方式、分布式可再生能源资源禀赋、管网建设水平等差异，两者在分布式可再生能源开发规模和利用模式上存在较大差异，具有较强的典型性和代表性。应重点关注分布式可再生能源在农村地区的利用模式及其经济、社会、生态和环境综合效益。如与农业生产生活相结合的生物质分布式可再生能源综合利用项目等，是否具有形成可复制、可推广、可评估、可考核的价值，都与利用模式研究密切相关。

利用模式即用户利用分布式可再生能源的方式，一种简单的方式是按照用能类型（电冷热气的一种或多种用能需求）和应用场景（社区、酒店、医院等）对分布式可再生能源利用模式进行划分，但这些划分方式难以体现与分布式可再生能源资源、技术和系统的关联特征。考虑分布式可再生能源概念中具有生产和利用一体化的特点，按照其资源（风、光、生物质等）和技术类型（新能源技术、热电联产等）进行划分，但无法区分多种资源和技术混合的分布式可再生能源系统。此外，可以按照单一或混合供能系统、微电网等组织形式进行划分，但不同形式之间彼此交叉涵盖的资源、技术宽泛，因此，较难与应用场景建立关联关系。

为此，按照以风光供能为主和以生物质供能为主 2 种类型对农村分布式可再生能源开展典型利用模式研究。这样既体现了资源、技术上的差异，又适用于不同分布式可再生能源资源、技术和系统。需要指出的是，这里的“为主”是一个

相对的概念，可以认为在系统供能中占据主导地位，一定程度上反映了应用场景的资源条件和用能需求，如表 1 所示。

表 1 分布式可再生能源典型利用模式特征
Table 1 Characteristics of typical DER utility modes

利用模式	组成特征
以风光供能为主	以风光等分布式可再生能源发电为主，如屋顶分布式光伏发电系统+储能系统等
以生物质供能为主	以作物秸秆、人畜粪便、生活垃圾等生物质废弃资源综合利用为主，通常具有相对稳定的输出，沼气和生物天然气等产品利用方式灵活多样

(1) 以风光供能为主的模式。以风光等分布式可再生能源发电为主，配合储能或其他可调可控电源，组成分布式可再生能源系统，如屋顶户用分布式光储系统、海岛风光柴储微电网^[17]等。该类系统以分布式可再生能源作为主要的供能单元，通过储能或其他可调可控单元实现系统特性的互补和调节，降低分布式可再生能源对管网的依赖，提升管网友好性和用户供能可靠性。

(2) 以生物质供能为主的模式。以农作物秸秆、人畜粪便、生活垃圾等生物质能资源综合利用为主，构成生物制气、发电、供热等多种用途相结合的分布式可再生能源系统。该系统以生物质发电或制气技术为主，一般具有相对稳定的输出，尤其是通过生物制气和提纯净化技术生产的生物天然气，与常规天然气成分、热值基本一致，颇具应用前景^[18]。

2 适应性分析

2.1 应用条件

结合研究中调研采集的大量分布式可再生能源系统案例信息，对分布式可再生能源不同利用模式的应用条件作了归纳总结，部分案例见表 2 及案例分析。

以风光供能为主的模式一般要求：（1）需要比较充足的建设场地和可再生能源资源，保证较低的供能成本；（2）建设地经济发达，电价水平高，企业经营比较稳健，用电企业负荷比较稳定；（3）当地有较好的可再生能源供能产业基础，或政府对可再生能源发展的补贴和支持力度较大。

以生物质供能为主的模式一般要求：（1）建



设地要有比较充足的生物质资源，保证较低的供能成本；（2）建设地有相对集中的农村用能和有机肥等复合型需求；（3）当地政府对农业、畜牧业和环保等相关产业补贴和支持力度较大。

表 2 分布式可再生能源典型利用模式适用性
Table 2 Application analysis of typical DER utility modes

利用模式	应用场景	工程案例
以风光供能为主	对农村偏远地区和海岛，利用安徽金寨光伏扶贫项目、屋顶、荒山荒坡、鱼塘等资源湖北巴东县蔡家村200 kW和可再生能源资源，向用户提光伏电站、山西临汾“红供电力需求	枣光伏”大棚项目
以生物质供能为主	适用于农、林、畜牧资源充足的农村和城镇周边地区，利用联产二期工程项目、山西农业等剩余价值，向农村或城阳城县东冶生物质气化镇用户提供燃气、有机肥、电电项目、山东潍坊生物质力或热力等	热电联产项目

2.2 应用场景

以风光供能为主的模式适用于场地、资源充足或对电力、热力有特定需求的地区，充分利用大量工业用户、公共建筑和居民用户屋顶资源和可再生能源资源，向具备条件的用户提供电力或热力需求。以生物质供能为主的模式适用于农、林、畜牧资源充足的农村及周边地区场景，既能有效利用农业等剩余价值，又便于相对集中地向新农村或农村周边用户提供沼气、有机肥、电力或热力等多种产品，如表 2 所示。

3 典型案例分析

基于大量调研案例和实际数据，选取农村地区的典型案例，采用自主开发的分布式可再生能源系统分析软件进行经济测算，探讨分布式可再生能源典型利用模式应用价值。

3.1 案例 1：农村扶贫+分布式光伏

光伏扶贫是国内首创的精准扶贫、精准脱贫

的有效扶贫模式，被国家列为精准扶贫十大工程之一。各地出台了大量的光伏扶贫政策，按照国家试点要求对光伏扶贫的商业模式进行了实践探索，一些典型的光伏扶贫建设和运营模式如表 3 所示。

本文以某农村地区光伏扶贫项目作为典型案例，分析其为相关方带来的效益。如图 1 所示，该村共有 4 台公用配变，共有居民 160 余户，其中 102 户适合安装光伏发电系统，考虑当地负荷、电网条件等因素^[19]，优化得出共 60 户安装光伏发电系统，每户安装 3 kW。其中，配电变压器（简称配变）1、配变 2、配变 3 和配变 4 馈线中可安装光伏的户数为 3、27、18 和 12 户。

光伏扶贫项目具有良好的经济和社会（生态）效益，在经济效益方面，该村光伏扶贫项目发电收益全部由贫困户获得，假设该村光伏扶贫项目年利用小时数为 1 000 h，光伏扶贫采用全额上网模式，上网电价为 1 元/(kW·h)，则 60 户共 180 kW 光伏扶贫项目年发电收益达到 18 万元，每户有 3 000 元的收益。另外，由于光伏扶贫项目就近接入配电网，可起到降低电网损耗的作用^[20]，经测算，降损效益达到 5 148 元。在社会（生态）效益方面，光伏扶贫项目可促进当地居民参与项目运维，提供就业岗位，同时还具有一定的节能和环境效益，节能效益以项目实际发电量和单位发电量减少的煤炭消耗的成本之积测算，环境效益以常规机组发出同等电量产生的污染物的处理成本进行衡量，测算得出节能和环境效益分别为 30 909 元和 28 571 元。

此外，在技术不断进步和光伏扶贫项目不断推进中，光伏扶贫项目可结合农村、农业、先进技术等，拓展多种应用场景。一是“光伏+”模式，如“光伏+”建筑、“光伏+”农业、“光伏+”渔业等，都是体现了光伏发电建设规模和选址灵活的特点，有效地发挥了土地、建筑表面

表 3 典型光伏扶贫案例及商业模式
Table 3 Typical PV poverty alleviation cases and business models

案例名称	投资建设模式	收益分配方式
安徽金寨户用光伏扶贫	地方政府、企业、贫困户或银行贷款各占 1/3	贫困户获得全部收入
山西临汾户用光伏扶贫	中央扶贫资金+当地政府配套	贫困户获得全部收入
宁夏永宁县	项目业主垫付	贫困户获得 400 元/年的屋顶使用费
国网阳光扶贫行动	企业 100%	贫困户获得收益

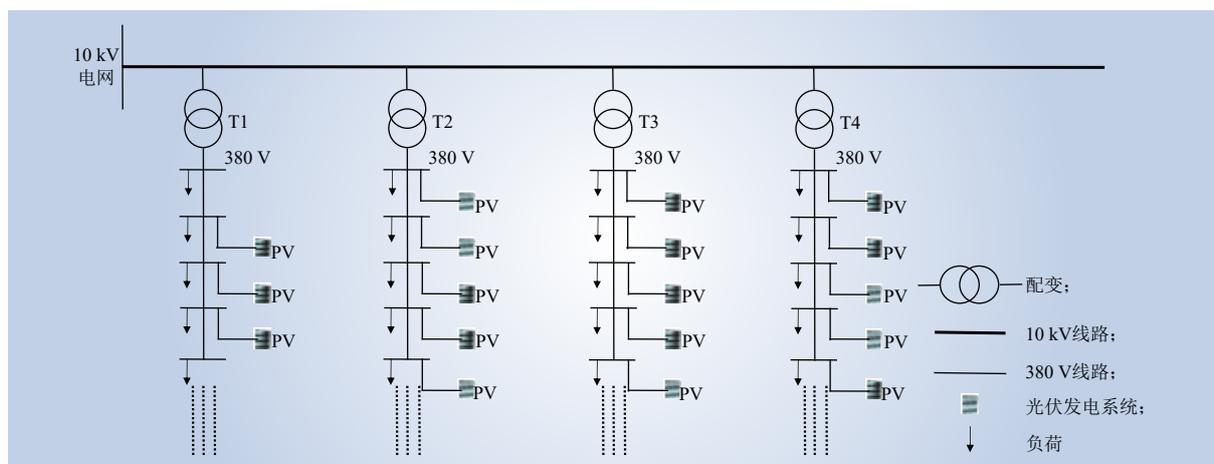


图 1 某村光伏扶贫项目接入示意

Fig. 1 Access schematic of PV poverty alleviation project

和水面等的剩余价值，因此也是政策鼓励的方向。二是基于微电网的分布式光伏发电应用模式，其具有独立于大电网运行的能力，在提高重要用户供电可靠性、消纳分布式新能源发电、解决农村偏远或海岛地区供电问题具有明显的技术优势^[21]。

3.2 案例 2: 农业资源循环利用+生物质分布式能源

生物天然气是指以畜禽粪便、农作物秸秆、城镇生活垃圾、工业有机废弃物等为原料，经厌氧发酵和净化提纯后与常规天然气成分、热值等基本一致的绿色低碳清洁环保可再生燃气。生物天然气+有机肥的发展模式，定位是以农业为主、能源为辅。根据国家发改委《关于完善农林生物质发电价格政策的通知》（发改价格〔2010〕1579号），全国统一的农林生物质发电标杆上网电价 0.75 元/(kW·h)。中国农林生物质发电动态投资平均约 10 140 元/kW，利用小时数为 5 232 h，燃料成本也是农林生物质发电成本重要组成部分，目前秸秆电厂的收购价在 150~200 元/t，计算过程中取秸秆收购价为 170 元/t，约 0.27 元/(kW·h)。

经测算，农林生物质发电项目收益率 6.64%，未达到理想的盈利水平。但与传统的户用沼气发酵、填埋等生物质利用模式相比，农村生物质分布式可再生能源综合利用模式需更多地与农村生产和生活融合，提高项目收益率，可选择的方式也很多，如已在一些北方地区推广的“四位一体”沼气生态温室模式、西北的“五配套”生态果园模式等^[12]。此外，生物质沼气发酵技术还可

与渔业、农副业、加工业等相结合，实现农村生物质能技术与农村生产、农业发展和生态保护的融合发展。此外，沼气发酵与填埋、焚烧发电等秸秆处理方式相比，优点是产气率高，且氮、磷等元素基本保留在沼渣之中。同时有机肥不改变当地土壤结构，长期对保持当地环境和生态系统平衡极为有利，且农民可获得部分政府补贴。此外，有机肥在发酵和堆埋过程中产生 70 °C 以上的高温，可以起到很好的消毒杀菌效果，比直接浇灌禽畜粪便的方式更为安全卫生。

综上所述介绍的分布式可再生能源不同应用领域典型利用模式案例，分析总结如表 4 所示。

从表 4 不同应用领域典型分布式可再生能源利用模式的应用结果对比来看，合理的分布式可再生能源利用模式在城镇和农村均可盈利；从利用模式来看，废弃资源利用为主和生物质供能为主的模式其综合效益更为明显，未来在城镇和农村地区具有重要推广价值，同时政策对跨部门、跨行业的项目支持力度有待加强。

4 结语

结合上述研究和案例分析，在新农村和偏远地区，适宜推广以生物质热电联产为主和以风光可再生能源发电为主的利用模式，适时适当鼓励离网型微电网的建设和发展。

依托分布式供能系统，构建农村商品化能源供应体系，在具备条件的农村地区，就近利用农



表 4 典型案例结果对比分析
Table 4 Comparison of results in different cases

案例	应用领域	利用模式	效益		应用推广
			经济效益	社会环境效益	
1	新农村	风光可再生能源供能为主	盈利能力较好	兼具环境效益和扶贫效益	技术基本成熟，在土地资源丰富的农村地区具备开发条件
2	新城镇	生物质供能为主	<8%，盈利能力有待提升	兼具环境效益和农业价值	技术条件和商业模式尚不成熟，局部地区具备应用推广条件

作物秸秆、畜禽粪便、林业剩余物等生物质资源，建设新农村分布式综合供能系统；在偏远农牧区和海岛地区，综合考虑当地的风光可再生能源、生物质、海洋能等资源条件和环境约束等，综合评估本地分布式可再生能源建设和大管网延伸的成本和能源供应需求，建设小型离网型分布式可再生能源供能系统或海岛微网系统。

本文重点对分布式可再生能源重点应用领域的利用模式开展了分析和探讨，为下一步开展农村分布式电源重点应用领域应用潜力评估、典型模式综合效益评估、区域细分的分布式可再生能源利用模式优化设计等研究奠定基础。

参考文献：

- [1] Energy Research Institute of Academy of Macroeconomic Research (NDRG), China's National Renewable Energy Center (CNREC). China's Renewable Energy Outlook 2017 (CREO17)[R]. 2017.
- [2] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- [3] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [4] 国网能源研究院. 中国新能源发电分析报告: 2017[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [5] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 3-10.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10.
- [6] 洪博文, 李琼慧, 王伟. 分布式能源在农村的应用 [J]. 能源, 2018(2): 64-67.
- [7] LI Longxi, MU Hailin, GAO Weijun, et al. Optimization and analysis of CCHP system based on energy loads coupling of residential and office buildings[J]. Applied Energy, 2014, 136: 206-216.
- [8] 王惠, 赵军, 安青松, 等. 不同建筑负荷下分布式能源系统优化与政策激励研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3734-3740.
WANG Hui, ZHAO Jun, AN Qingsong, et al. Study on optimization and policy incentives of distributed energy system under different building loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3734-3740.
- [9] 林世平. 分布式能源系统中能源与环境耦合特性及优化集成模型研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
LIN Shiping. Research on coupling characteristics and integrated optimization model of energy and environment based on DES[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [10] MEHLER E D, SARIMVEIS H, MARKATOS N C, et al. Optimal design and operation of distributed energy systems: application to greek residential sector[J]. Renewable Energy, 2013, 51(3): 331-342.
- [11] 西门子, 英国 Arup 咨询公司. 分布式能源系统: 灵活、高效, 开启全新能源时代 [R]. 北京: 英国 Arup 咨询公司, 2017.
- [12] 王满商, 李正明, 汪洋. 考虑电动汽车不确定性因素的配电网分布式电源优化布置 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(01): 67-72.
WANG Manshang, LI Zhengming, WANG Yang. Distribution network distributed power supply configuration considering the uncertainties of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(01): 67-72.
- [13] 田贺平, 孙舟, 王伟贤, 等. 考虑节能效益的企业分布式电源优化配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 38-47.
TIAN Heping, SUN Zhou, WANG Weixian, et al. Enterprises distributed power optimization allocation considering energy-saving benefit[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 38-47.



[14] 张无敌, 田光亮, 尹芳, 等. 农村能源概论 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.

[15] 安晓华, 欧阳森, 杨家豪. 分布式供能系统场景竞争力的分类评价模型及应用 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(10): 69–75, 109.
AN Xiaohua, OUYANG Sen, YANG Jiahao. Classified evaluation model for scenario competitiveness of distributed energy supply system and its application[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(10): 69–75, 109.

[16] REN H, ZHOU W S, GAO W J. Optimal option of distributed energy systems for building complexes in different climate zones in China[J]. *Applied Energy*, 2012, 91(1): 156–165.

[17] 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.

[18] 白红春, 孙清, 葛慧, 等. 我国生物天然气产业发展现状 [J]. *中国沼气*, 2017, 35(6): 33–36.
BAI Hongchun, SUN Qing, GE Hui, *et al.* Development of bio-methane industry in China[J]. *China Biogas*, 2017, 35(6): 33–36.

[19] 黄碧斌, 李琼慧, 高菲. 基于多因素权重优化的分布式电源布局预测方法 [J]. *中国电力*, 2016, 49(3): 172–177.
HUANG Bibin, LI Qionghui, GAO Fei. A prediction method for distributed generation layout based on multi-factor weights optimization[J]. *Electric Power*, 2016, 49(3): 172–177.

[20] 贡晓旭, 金强, 王基, 等. 典型功能区分布式光伏接入对配电网建设改造的影响 [J]. *中国电力*, 2016, 49(3): 166–171.
GONG Xiaoxu, JIN Qiang, WANG Ji, *et al.* Effects of distributed PV connected to grid on distribution network constructions in typical functional zones[J]. *Electric Power*, 2016, 49(3): 166–171.

[21] 张帆, 杨明皓. 中国农村分布式供能模式供需分析 [J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(23): 121–125.
ZHANG Fan, YANG Minghao. supply and demand analysis of rural distributed energy supplying mode[J]. *power system protection and control*, 2010, 38(23): 121–125.

作者简介:

洪博文 (1985—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 从事分布式电源和微电网的政策、管理及规划研究, E-mail: bowenhh@sina.com;
冯凯辉 (1986—), 男, 高级工程师, 从事分布式电源和微电网的政策、管理、规划及并网运行研究, E-mail: fengkhuai@163.com。

(责任编辑 杨彪)

Discussion of Distributed Energy Resources Utility Mode and Its Application in Rural Areas of China

HONG Bowen^{1,5}, FENG Kaihui¹, MU Yunfei², DONG Xiaohong², LIANG Yi³, YAN Hu¹, HE Yongsheng⁴
(1. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 3. State Grid Liaoning Electric Power Company Economic Research Institute, Shenyang 110015, China; 4. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 5. State Grid Energy Internet Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Based on a systematic review of the definition and characteristics of distributed energy resources(DER) at home and abroad, several typical utility modes of distributed energy resources are summarized for rural areas with consideration of the main problems existing in the development of distributed energy resources in China. Based on the features of resources and demand in different applications scenarios, an in-depth analysis is made of the basic characteristics, applicable scope as well as application conditions of the different utility modes. Finally, typical case studies are carried out focusing on distributed energy resources utility modes in the three application scenarios, and suggestions are given on the promotion of distributed energy resources utility modes suitable for the rural areas in China.

This work is supported by the Science and Technology Project of SGCC (Research on Technologies of Distributed Power Development Potential Evaluation and Management and Operation Optimization under the Stage of Large-Scale Development, No.1400-201927279A-0-0-00).

Keywords: distributed energy resources; utility mode; application scenarios; biomass natural gas; PV poverty alleviation