

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.02.009

分布式储能应用模式及优化配置综述

闫群民¹, 穆佳豪¹, 马永翔¹, 王勇², 孙阳阳²

(1. 陕西理工大学电气工程学院, 陕西 汉中 723001;

2. 陕西省地方电力(集团)有限公司汉中供电分公司, 陕西 汉中 723001)

摘要: 分布式储能的广泛应用, 有效解决了大规模分布式电源(DG)接入配电网和负荷急剧增长给电网规划运行带来的诸多问题。分布式储能具有功率吞吐快、控制精度高、安装灵活、多主体利益等特点, 可有效保障配电网供电的安全与稳定性。文中对分布式储能发展状况进行梳理, 根据其接入位置在DG侧、中低压配电网侧、用户与微电网侧, 分析近年来国内外分布式储能应用模式的优点及劣势, 重点就其选址定容问题对比分析分布式储能优化配置的各类数学模型及优化算法。最后, 结合分布式储能在配置过程中存在的问题, 对其发展趋势进行了展望。

关键词: 分布式电源(DG); 分布式储能; 新能源; 应用模式; 选址定容; 优化配置

中图分类号: TM732; TK02

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)02-0067-08

0 引言

随着全球能源格局的变革, 以光伏、风电为主的新能源技术逐渐成熟, 并趋于商业化^[1-2]。新能源发电很大程度上依赖地理、天气、季节等因素, 波动性强且不易稳定, 因此对电网的调节能力、网络规划、消纳能力、调度运行、保护控制等方面提出了更高要求^[3-4]。另外, 大规模分布式电源(distributed generation, DG)加入电网可能引起源荷间供需不平衡, DG发出的电能若不能及时被消纳, 将会影响电网运行的稳定性和经济性, 这些影响在中低压配电网中更为明显^[5]。

分布式储能技术为解决上述问题提供了新思路, 其可对能量进行时空平移, 并在进行充、放电时等效为负荷或电源, 通过有序控制储能系统的能量吞吐, 可实现多主体利益^[6]。分布式储能在电力系统各环节都有相应的应用模式, 可有效消除昼夜峰谷差、增强设备利用效率、促进新能源消纳、进行调压调频、平滑新能源功率波动、参与需求侧响应等。分布式储能拥有巨大的应用市场, 是维持供需动态平衡的关键设备, 还是一种延缓高额基础设施建设的方案, 在提高能效、减少碳排放中起着关键作用, 是分布式发电、智能电网、微电网发展的重要支柱^[7]。然而分布式储能在改善新能源并网问题、提高电力系统运行稳定性与经济性的同时, 也存在储能之间过于分散、联合控制难、储能与传统设备之间协调控制难以及各控制策略之间如何平滑切换等关键性问题。因此, 有必要对现有分布式储能的

应用模式进行分析总结, 给出各应用模式下分布式储能的存在问题及发展建议。研究不同应用模式下分布式储能的优化配置对其在电网中的有效应用至关重要, 合理规划分布式储能不仅可以实现能源充分利用、降低配电网备用容量, 还可以发挥分布式储能的规模化汇聚效应, 提高电网供电安全性及运行效率。分布式储能优化配置的关键问题为选址定容及运行策略的选择。在数学建模时, 一般根据不同应用模式需求选择相应的目标函数, 综合考虑经济性与技术性指标^[8], 并采取适当的求解算法进行有效求解。

文中针对分布式储能应用模式及优化配置问题, 首先梳理分布式储能发展状况及典型应用案例, 分析分布式储能在电力系统中的各类应用模式及原理, 鉴于现有研究的不足提出各模式下关键技术的发展建议。进而对比国内外分布式储能优化配置的数学模型和各模式下的主要优化目标, 分析现有求解算法的优劣性, 并指出建模及求解过程中存在的问题。文中研究内容对拓展分布式储能的应用模式、优化分布式储能在电网中的应用成效具有一定的参考价值。

1 分布式储能的发展及应用

分布式储能是一种容量小且普遍靠近于负荷端的储能配置形式, 常应用于中低压配电网及智能微电网中。相较于集中式储能, 分布式储能安装地点灵活、投资费用低, 功率介于几千瓦至几兆瓦之间, 持续放电时间较短, 且容量一般不大于10 MW·h^[9]。分布式储能物理形态多样, 包括新能源电厂储能、社区储能、电动车储能、数据中心储能、

收稿日期: 2021-09-23; 修回日期: 2021-12-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900600)

家庭储能、移动式储能等。目前,各种分布式储能技术的发展着重于提升转化效率、提高功率密度和能量密度、降低成本。其中,电化学储能因具有响应快速、双向调节、控制精准、适用面广的优势得以迅速发展,目前锂离子电池最为成熟^[10]。电化学储能是未来分布式储能的主要发展方向。

目前国内外分布式储能的应用场景主要是为了支撑 DG 并网、提升负荷中心 DG 消纳水平以及维持智能电网和微电网的安全稳定运行。我国已将储能作为综合能源示范项目中的重要技术支撑,以光储系统为例,在光储建设力度加大以及光伏成本下降的背景下,用户侧光储系统发展迅速。在亟需解决新能源并网问题而实施大规模补贴政策的德国,光储市场更是超常规发展,这种应用模式已成为降低用户侧电费、提升供电可靠性的重要方式。此外,以可移动集装箱为载体的移动式储能具有可移动性强且响应快速的特点,在国内也有诸多应用,尤其在重要负荷保电方面成为首选。

2 分布式储能应用模式

储能的作用时间跨度为秒级至小时级,故其在电力系统中的应用模式十分丰富。应用模式决定其运行状态,根据目前分布式储能在电力系统中的接入位置,其应用模式分为 DG 侧、中低压配电网侧、用户与微电网侧。

2.1 DG 侧

2.1.1 改善 DG 输出曲线

DG 输出功率具有随机波动性,其接入配电网易导致并网容量受限^[11]。将储能特性与 DG 自身调节特性相融合,利用分布式储能与 DG 成套并网,能够抑制 DG 功率波动,减少 DG 对配电网的冲击,从源头提升 DG 的可控性与并网能力,亦可实现生产计划的追踪。该应用模式的基本原理为分布式储能追踪 DG 出力,在 DG 输出功率尖峰或低谷时段,储能分别储存或释放电能,满足并网点功率波动相关要求,并网功率为 DG 出力以及储能功率之和^[12]。

在分布式储能改善 DG 功率输出方面,现有研究得出的储能容量利用率偏低,且采用的大都为简化的储能模型,与实际差别较大。应在分布式储能能量实时管理、超短期预测精度提升方面开展研究^[13],并在设计平滑功率波动控制算法时,考虑分布式储能特征参数之间的关联性,建立更为科学的大规模 DG 并网模型与储能模型,从而更好地改善 DG 功率输出并延长储能寿命。

2.1.2 并网点有功控制及无功补偿

为了从源头减小高渗透率 DG 并网对配电网电压质量的影响,在新能源并网时储能系统采用具有四象限功率运行模式的逆变器^[14],可灵活对注入并网点的功率进行控制并实现无功就地补偿。传统并网逆变器在调节并网点电压的同时会出现串联谐振、功率因数低等问题^[15],应对传统并网逆变器结构、功能及控制策略进行改进,与电网实时交换有功、无功功率的同时,减小其对配电网带来的负面作用,充分发挥分布式储能进行有功控制及无功补偿的优势。

2.2 中低压配电网侧

2.2.1 参与系统调峰

由于 DG 出力峰值和负荷峰值并不重合,负荷峰谷差逐年递增,而用户对供电可靠性的要求逐年提高。当高渗透率 DG 接入配电网时,多余的电能往往不能被及时消纳,部分 DG 只能舍弃单位功率因数运行模式,甚至停机,造成弃光、弃风等严重的资源浪费现象。使用储能系统的能量时空平移特性参与调峰,对负荷曲线进行削峰填谷,可有效优化配电网潮流分布、减小网损、缓解功率堵塞以及减缓输配电设施升级,目前常用的削峰填谷优化策略为控制负荷方差^[16]。

为实现分布式储能更好地参与系统调峰,在建模时应考虑 DG 季节特性、负载曲线和调峰需求等因素,并采用合适的充放电策略,合理布局储能单元位置及容量^[17]。相关研究在求解过程中提出储能调峰容量概念^[3],该值可为调度人员提供储能系统可调度容量范围,具有较强的实用价值。但目前储能参与系统调峰的研究多从储能技术方面考虑且较少涉及调峰收益评估模型。为增强储能实用性,现阶段应研究分布式储能如何与现有调峰手段更好地结合,进一步细化调峰效益评估模型与储能容量需求模型。

2.2.2 参与系统辅助调频

分布式储能具有调节功率快速、控制精度高的特点,为了缓解系统调频压力,可利用分布式储能辅助电网调频。随着 DG 渗透率的进一步提升,这种调频方式将成为电力调频的重要方式。火电与储能共同调频的模式已经商业化,有效解决了火电机组爬坡率慢、调节精度低等问题。为提高 DG 调频能力,防止负荷变化使系统频率不稳定而导致 DG 脱网的情况,也有研究充分考虑储能调节能力,构建光储、风储参与系统调频的控制策略^[18],如考虑调频模型中调节死区提出调频系数计算方法进

而优化调频策略等^[19]。在储能参与自动发电控制(automatic generation control, AGC)方面,文献[20]建立了相应的经济性模型,包括储能的寿命和容量,制定了辅助系统调频的控制方法,在提升 AGC 调节能力的同时满足了储能的经济性要求。

然而现有研究对大规模 DG 影响电网频率波动特性的机理分析不足,没有较深入地从理论层面体现储能参与系统调频相对于传统调频电源的潜在优势,还应进一步研究各类型储能之间、储能与传统调频电源之间的协调控制策略。

2.2.3 参与系统调压

大量 DG 接入电网将改变系统的潮流分布,同时由于 DG 输出的不确定性将出现部分节点电压越限的情况,严重时可能导致电压崩溃。配电网中有功、电压耦合度较高,因此该类问题对配电网的影响极为突出。国内配电网起步较晚,传统的调压装置调节能力有限,分布式储能的兴起逐步成为配电网调压的重要手段之一。储能参与系统调压可弥补传统电压调节设备受动作次数限制、反应慢等问题,可有效改善系统电压水平。目前,充分结合网络既有的有载调压变压器、静止无功补偿装置等无功补偿设备与 DG、储能进行电压协调控制是最经济且灵活的手段^[21]。通常将传统调压设备作为主控手段,分布式储能和具有调节能力的 DG 作为辅助措施^[22],缓解传统调压手段的压力,实现对本地以及其他关键节点电压的调控。在协调控制方面,可根据不同时间或空间尺度制定电压控制策略^[6],由于不同调压设备的动作时间长短不一致,所以依据时间尺度的划分原则将电压控制策略分为日前优化、日内优化、日前-日内协调优化 3 种不同的协调优化模式。还可从空间尺度出发,以调压设备所在的不同区域或以不同馈线分支对电压控制策略进行划分。同时为提升储能参与系统调压的能力,针对大规模 DG 并网系统,应进一步研究分层分区自动调压控制、储能系统与其他无功补偿设备的电压协调控制以及各控制策略之间平滑切换等问题。

2.3 用户与微电网侧

分布式储能接入工商业用户侧可以提高电能质量、提高新能源渗透率、充当紧急后备电源、响应各种扰动以及保障电力用户供电的安全稳定性。同时分布式储能是改善微电网电源特性、保证供电质量的关键,在微电网侧分布式储能还可实现诸如新能源自发自用、减少电费支出、就地消纳电能、减少输电线路损耗、降低扩容费用、为增强网络抗灾能力作为后备电源和黑启动电源、给无电偏远地区

及军事基地等特殊场所供电的功能。

2.3.1 参与需求侧响应

分布式储能在负荷高峰时段积极响应电网调度,缓解电网高峰供电压力,保证电网源荷之间的供需平衡从而获取补贴,同时又保护了电力系统运行的安全性。用户侧储能可根据每日不同时段电价的差异进行有序充放电,从而赚取差价,获得收益。为了提升该模式下的市场化收益,相关研究从探索用户侧储能合理的收益模式出发,分析了分布式储能潜在的多方面收益^[23]。该应用模式一般将储能作为需求侧响应资源参与容量市场,根据实时电价制定储能充放电策略,并根据经济收益最大化制定储能的功率和容量。在此基础上,文献[24]提出需求侧响应-储能调节的优化模型,计算结果表明该模型在实现用户日收益最大化的同时还可实现削峰填谷,提高配电网运行可靠性。

分布式储能具有空间分布散且容量小的特点,很难作为调度资源被电网直接使用^[25]。为应对未来大量储能系统参与电力市场,下一步应重点研究分布式储能的聚合管理以及参与调峰调度的方式,挖掘需求侧储能在获取利润的同时参与电网运行的能力。

2.3.2 后备电源

采用电化学储能的移动式储能因其快速响应、易于安装、不受地域限制、污染小等优点在后备电源模式下广泛应用^[26],且电化学储能可以实现毫秒级响应,从空载至满载的响应时间仅为秒级。在应对自然灾害及季节性负荷等问题时,移动式储能可作为快速备用电源向负荷供应电能,避免因停电造成的重大损失,这种应用模式在重要负荷用户,特别是医药、先进电子制造、数据中心、化纤生产等行业得到应用,效益亦显而易见。为了最大程度减小停电时的负荷损失量,保障生产生活安全与经济财产,关于可移动储能与电源的联合运行方法、分布式储能资源汇聚技术^[27]以及利用移动式储能的灾后恢复策略^[28]等成为研究热点。

2.3.3 提高供电质量

微电网中大量电力电子装置的应用使得其在运行过程中不可避免地会产生电压暂降、波形畸变、高次谐波注入、功率因数低等问题。通过在微电网及用户侧安装储能可以显著提高供电质量。同时,响应速度快的储能可使微电网在切换运行模式的过程中平滑过渡,减小暂态冲击^[29],在孤岛运行模式下保持电压稳定,其中微电网运行状态无缝切换控制是难点。在发展智能电网的需求背景下,

电动汽车、智能楼宇微电网等新兴产业模式在未来将迅速发展。为减小新产业发展对供电质量的影响,可以利用储能系统和电动汽车的灵活性对楼宇微电网联络线进行功率波动平抑^[30],或利用车网互联技术实现电动车与电网之间双向互动^[31],在节省充电成本的同时减少电网供电压力,提升供电质量。

微电网易受外界冲击,故可能同时存在多类型的电能质量问题^[32],但现有研究基本均针对单一特定问题提出相应策略,未来应重点研究集成化电能质量治理技术,其核心为并网逆变器、电能质量调节器拓扑及控制方式的改进,最终达到微电网多种电能质量统筹治理的目的。

3 分布式储能优化配置

如前所述,分布式储能在电力系统各层面都有其应用模式,不同应用模式下分布式储能合理的功率、容量、位置选择对配电网的安全性与经济性至关重要,在选址定容时还应考虑分布式储能之间的强耦合性。分布式储能的配置本质上是一个多目标优化问题,根据储能不同应用模式的需求选取适当的目标函数,以系统及储能的运行特性作为约束条件,并选择适当的算法对数学模型进行求解。

3.1 数学模型

分布式储能各应用模式的优化配置在数学模型方面因价值衡量方式的差异,其目标函数、约束条件、变量维数也有所不同。考虑到目前储能配置成本依旧高昂,各模式下的目标函数大都考虑经济性因素,主要包括投资成本及运维成本^[33-36]。

在分布式储能优化配置中,除了考虑投资成本外,电源侧的优化目标主要考虑电力综合性能与波动指标,如弃风弃光率最小、平滑 DG 输出功率的能力、发电效率、并网电压质量、预测误差最小等。电网侧主要综合考虑技术和经济指标,如调峰调压调频能力、电网升级改造进程、环境效益^[37]、网络拥堵程度、网损情况、新能源消纳程度等。用户及微电网侧则主要考虑为用户牟利的同时提高电能质量,以控制联络线功率波动、减少电费支出、提高供电可靠性、参与需求侧响应为主。为了大幅减小储能系统建设成本,进一步提高分布式储能效益,在其规划方法方面还可充分挖掘电网现有有效资源,综合考虑用户侧各种可控资源,将蓄电池储能、电动汽车集群、可平移负荷等设备均视为广义储能进行统一规划^[38]。或者根据源荷的季节特性采用动态规划方法,确保储能能在每个季节都能发挥优势^[39],提高分布式储能利用率。还可以根据人工经验、自

然地理条件、网络架构等特点进行预选址,减小优化算法在搜索过程中的计算量,提高解的优越性。

由于分布式储能具有多方面的效益,建立更为全面精确的综合效益数学模型将成为研究重点。现有研究中的数学模型大都是包含经济效益与社会效益的多目标优化模型,但多目标之间往往相互制约,必须分清主次,尽量使总体目标函数最优。为简化多目标问题的计算过程,多采用线性加权法^[40],或者在多个目标函数中选择一个进行优化,其余的目标通过加限值的方式转化成约束条件,最终化简为单目标优化问题。然而,此类方法存在明显缺点,如单目标权值与目标函数的界限难以确定、各目标之间量纲不统一可能导致鲁棒性差等。

3.2 求解算法

在储能优化配置的求解算法方面,根据所建数学模型特征可选用 3 类优化算法:分析法、数学优化方法和启发式算法。分析法是指不使用特定优化工具的方法,一般不考虑网络与储能运行约束,仅从历史负荷曲线或统计数据人为进行分析。例如根据风电预测误差、DG 渗透率、断电持续时间、历史负荷及 DG 运行数据^[41]等人为分析出储能的功率和容量。这种方法计算简单但结果比较粗略,受主观因素影响大,一般无法同时优化选址与定容。数学优化方法可有效找到模型的近似最优解,但对数学模型的分类及要求比较高,根据数学模型的不同特征可使用线性规划、二阶锥规划、动态规划、随机规划、穷举搜索等。在处理小规模单目标问题时数学优化方法简单可靠,但这些数学优化方法在面对日益复杂的工程优化问题时往往束手无策。因此,遗传算法、粒子群优化算法、灰狼算法等启发式算法由于效率高、建模简单、普适性强的特点迅速发展,但启发式算法普遍有落入局部最优的风险,对此类算法进行改进并使之在储能优化配置问题中有更好的收敛性与效率是目前的研究重点。如文献[42]提出采用改进的多目标粒子群优化算法求解微电网储能配置的双层规划模型,通过最优相似度确定动态权重系数,对某些粒子进行交叉变异,在跳出局部最优解的同时保证其收敛性,并采用动态更新保证 Pareto 解集的均匀性。

各类算法的复杂性与适用领域存在差异,应针对特定问题设计相应算法,对不同算法进行取长补短、改进优化,使之能在解决特定问题时更好地平衡局部与全局的搜索能力。另外,在处理多目标问题的算法中,收敛性的理论证明尚待研究,且常见伪有效解、计算量大、Pareto 解集选取等问题也有待

解决。下一步应重点针对如何改善算法计算效率、实现高维目标优化、完善最优解满意度衡量指标等方面进行研究。

4 总结及展望

文中在分析分布式储能技术发展现况的基础上,详细归纳了其在电力系统各侧的应用模式,并从数学模型及优化求解算法两方面研究对比了分布式储能的优化配置问题。结合储能应用配置中存在的一些问题,主要结论及展望如下。

在电源侧,分布式储能可改善 DG 输出曲线、改善并网点电压质量、提高 DG 运行效率等,在解决高渗透率 DG 并网问题中起关键性作用。随着可再生能源配套储能政策的进一步落实,分布式储能在电源侧的应用模式将会愈发普遍,为此应在储能能量实时管理、追踪计划出力、多类型储能协调控制、超短期预测精度、并网逆变器结构及控制策略等方面进行深层次研究。

在电网侧,分布式储能主要用于参与系统调峰调频、承担事故安全响应、提升新能源消纳等。电网侧储能增强了系统调节能力,有助于提升系统运行可靠性和灵活性,在泛在电力物联网进程中有十分重要的作用。未来仍须研究经济与社会效益相结合的分布式储能规划方案,建立更全面的电网侧经济性评估体系,优化分布式储能参与统一调度管理方式,充分发挥分布式储能在电网侧的调节能力。

在用户及微电网侧,分布式储能在提高供电可靠性、节省电费支出、参与需求侧响应等方面发挥了重要作用,其中峰谷套利是吸引用户投资的主要动力之一。目前用户侧储能还存在市场机制不健全、统一管理困难、电能质量治理难等问题,为此应整合网络中包括电动汽车、云储能、负荷聚集商等在内的储能资源,对其进行全局性控制并制定相关技术规范,提升分布式储能运行效率。未来随着峰谷电价机制和储能参与辅助服务补贴政策的进一步完善,用户侧储能将成为最有发展潜力的领域。

在实现一储多用、发展储能共享化的趋势下,分布式储能正朝着多元化功能、多时间尺度发展,所带来的效益是多方面的。但现有关于储能优化配置的方法多是针对某一主体利益,用户、DG 投资商、电网公司之间的利益分配不合理,不利于分布式储能发展。为此应进行分布式储能价值衡量及利益划分研究,完善市场交易及责任划分机制。

在分布式储能优化配置过程中首先要满足储能的技术指标要求,其次考虑经济性及社会效益。

储能优化配置的数学模型越来越精确,其复杂度、目标函数类型和数目都随之增加。应加强多目标优化算法改进的研究,使之能够解决特定多目标优化问题,更好地平衡各目标函数之间的关系,从而得到满意解,进一步提高算法收敛速度与精度。

参考文献:

- [1] 李建林,马会萌,惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报,2016,31(14):1-10,20. LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10, 20.
- [2] VALENCIA A, HINCAPIE R A, GALLEGO R A. Optimal location, selection, and operation of battery energy storage systems and renewable distributed generation in medium-low voltage distribution networks [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 34: 102158.
- [3] 丁明,方慧,毕锐,等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8): 2187-2201,2. DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2187-2201, 2.
- [4] XING L T, MISHRA Y, TIAN Y C, et al. Distributed voltage regulation for low-voltage and high-PV-penetration networks with battery energy storage systems subject to communication delay [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(1): 426-433.
- [5] 姜炜超,沈冰,李响,等. 基于 5G 的含分布式电源智能分布式馈线自动化实现方法[J]. 供用电,2021,38(10):57-63. JIANG Weichao, SHEN Bing, LI Yun, et al. A method of intelligent distributed feeder automation with distributed generation based on 5G [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(10): 57-63.
- [6] 张晓花,王晓亮,廖重阳,等. 基于一致性算法的储能单元分布式优化调度策略[J]. 电力需求侧管理,2021,23(3): 41-46. ZHANG Xiaohua, WANG Xiaoliang, LIAO Chongyang, et al. Distributed scheduling strategy of energy storage unit based on consensus algorithm [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(3): 41-46.
- [7] 刘继春,陈雪,向月,等. 考虑用电形态相似度的多用户共享储能投资决策[J]. 全球能源互联网,2021,4(1):95-104. LIU Jichun, CHEN Xue, XIANG Yue, et al. Investment decision for multi-user shared energy storage considering similarity of daily load profile [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 95-104.
- [8] 方保民,李红志,孔祥鹏,等. 含高比例光伏出力的长期分布式储能配置研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(2): 121-129.

- FANG Baomin, LI Hongzhi, KONG Xiangpeng, et al. Research on long-term distributed energy storage configuration with a high proportion of photovoltaic output [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(2): 121-129.
- [9] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [10] PADMANABHAN N, AHMED M, BHATTACHARYA K. Battery energy storage systems in energy and reserve markets [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(1): 215-226.
- [11] 李建林, 谭宇良, 王含, 等. 配网及光储微网储能系统配置优化策略 [J/OL]. *高电压技术*, 2021: 1-12 [2021-09-17]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201333>.
LI Jianlin, TAN Yuliang, WANG Han, et al. Optimization strategy of energy storage system configuration of distribution network and optical storage microgrid [J/OL]. *High Voltage Engineering*, 2021: 1-12 [2021-09-17]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201333>.
- [12] 何小良, 章雷其, 谭海云, 等. 微网中分布式电源和多储能的协调控制策略 [J]. *电源学报*, 2016, 14(2): 103-111.
HE Xiaoliang, ZHANG Lei, TAN Haiyun, et al. Cooperative control strategy for distributed generations and energy storage units in microgrid [J]. *Journal of Power Supply*, 2016, 14(2): 103-111.
- [13] 何川, 刘天琪, 胡晓通, 等. 基于超短期风电预测和混合储能的风电爬坡优化控制 [J]. *电网技术*, 2017, 41(3): 782-790.
HE Chuan, LIU Tianqi, HU Xiaotong, et al. Optimal control of wind ramp based on very short-term wind forecast and hybrid ESS [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(3): 782-790.
- [14] 贾兆昊, 张峰, 丁磊. 考虑功率四象限输出的配电网储能优化配置策略 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 105-113.
JIA Zhaohao, ZHANG Feng, DING Lei. Optimal allocation strategy of energy storage in distribution network considering power four-quadrant output [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 105-113.
- [15] 韩永强, 徐明忻, 孙碣, 等. 改进 LADRC 的储能逆变器直流母线电压控制 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(1): 13-21.
HAN Yongqiang, XU Mingxin, SUN Jie, et al. Improved DC bus voltage control of LADRC energy-storage inverter [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(1): 13-21.
- [16] 杨玉青, 牛利勇, 田立亭, 等. 考虑负荷优化控制的区域配电网储能配置 [J]. *电网技术*, 2015, 39(4): 1019-1025.
YANG Yuqing, NIU Liyong, TIAN Liting, et al. Configuration of energy storage devices in regional distribution network considering optimal load control [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(4): 1019-1025.
- [17] KALKHAMBKAR V, KUMAR R, BHAKAR R. Energy loss minimization through peak shaving using energy storage [J]. *Perspectives in Science*, 2016, 8: 162-165.
- [18] MIAO L, WEN J Y, XIE H L, et al. Coordinated control strategy of wind turbine generator and energy storage equipment for frequency support [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, 51(4): 2732-2742.
- [19] 李军徽, 侯涛, 穆钢, 等. 基于权重因子和荷电状态恢复的储能系统参与一次调频策略 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(19): 63-72.
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Primary frequency regulation strategy with energy storage system based on weight factors and state of charge recovery [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(19): 63-72.
- [20] 陈丽娟, 姜宇轩, 汪春. 改善电厂调频性能的储能策略研究和容量配置 [J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(8): 52-59.
CHEN Lijuan, JIANG Yuxuan, WANG Chun. Strategy and capacity of energy storage for improving AGC performance of power plant [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(8): 52-59.
- [21] LIU X H, AICHHORN A, LIU L M, et al. Coordinated control of distributed energy storage system with tap changer transformers for voltage rise mitigation under high photovoltaic penetration [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(2): 897-906.
- [22] 张江林, 庄慧敏, 刘俊勇, 等. 分布式储能系统参与调压的主动配电网两段式电压协调控制策略 [J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(5): 15-21, 29.
ZHANG Jianglin, ZHUANG Huimin, LIU Junyong, et al. Two-stage coordinated voltage control scheme of active distribution network with voltage support of distributed energy storage system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(5): 15-21, 29.
- [23] 沈汉铭, 俞夏欢. 用户侧分布式电化学储能的经济性分析 [J]. *浙江电力*, 2019, 38(5): 50-54.
SHEN Hanming, YU Xiahuan. Economic analysis of distributed electrochemical energy storage on the user-side [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(5): 50-54.
- [24] 麻秀范, 陈静, 余思雨, 等. 计及容量市场的用户侧储能优化配置研究 [J]. *电工技术学报*, 2020, 35(19): 4028-4037.
MA Xiufan, CHEN Jing, YU Siyu, et al. Research on user side energy storage optimization configuration considering capacity market [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(19): 4028-4037.
- [25] 林立乾, 米增强, 贾雨龙, 等. 面向电力市场的分布式储能聚合参与电网调峰 [J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(2): 276-283.
LIN Liqian, MI Zengqiang, JIA Yulong, et al. Distributed energy storage aggregation for power grid peak shaving in a power market [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(2): 276-283.
- [26] QU Z L, CHEN J J, PENG K, et al. Enhancing stochastic multi-microgrid operational flexibility with mobile energy storage sys-

- tem and power transaction[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 71: 102962.
- [27] LEE J, WON D. Optimal operation strategy of virtual power plant considering real-time dispatch uncertainty of distributed energy resource aggregation[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 56965-56983.
- [28] 任郡枝, 陈健, 姜心怡, 等. 考虑可移动式储能与网络重构的弹性配电网灾后恢复策略[J]. *电力建设*, 2020, 41(3): 86-92.
REN Junzhi, CHEN Jian, JIANG Xinyi, et al. Post-disaster recovery strategy of resilient distribution network considering mobile energy storage system and network reconfiguration[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(3): 86-92.
- [29] 陈景文, 肖妍, 莫瑞瑞, 等. 考虑光伏校正的微电网储能容量优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(10): 59-66.
CHEN Jingwen, XIAO Yan, MO Ruirui, et al. Optimized allocation of microgrid energy storage capacity considering photovoltaic correction[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(10): 59-66.
- [30] 杜丽佳, 靳小龙, 何伟, 等. 考虑电动汽车和虚拟储能系统优化调度的楼宇微网络功率平滑控制方法[J]. *电力建设*, 2019, 40(8): 26-33.
DU Lijia, JIN Xiaolong, HE Wei, et al. A Tie-line power smoothing control method for an office building microgrid by scheduling thermal mass of the building and plug-in electric vehicles[J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(8): 26-33.
- [31] TAN C L, CHEN Q H, ZHOU K L, et al. A simple high-performance current control strategy for V2G three-phase four-leg inverter with LCL filter[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5(3): 695-701.
- [32] 杨晓雷, 丁磊明, 李逸涛, 等. 计及风电不确定性的混合储能系统优化配置研究[J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(6): 69-74.
YANG Xiaolei, DING Leiming, LI Yitao, et al. Study on optimal allocation of hybrid energy storage system considering wind power uncertainty[J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(6): 69-74.
- [33] 张怡, 郝思鹏. 不同场景下快速充电站的分层储能配置[J]. *供用电*, 2020, 37(7): 94-100.
ZHANG Yi, HAO Sipeng. Hierarchical energy storage configuration of fast charging station in different scenarios[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(7): 94-100.
- [34] ZHANG Q M, REN Z C, MA R G, et al. Research on double-layer optimized configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system with connected distributed wind power[J]. *Energies*, 2019, 12(20): 3964.
- [35] 张尔佳, 邵能灵, 陈旻, 等. 基于虚拟储能的综合能源系统分布式电源功率波动平抑策略[J]. *发电技术*, 2020, 41(1): 30-40.
ZHANG Erjia, TAI Nengling, CHEN Yang, et al. A coordination strategy to smooth power fluctuation of distributed generation in integrated energy system based on virtual energy storage[J]. *Power Generation Technology*, 2020, 41(1): 30-40.
- [36] 傅旭, 李富春, 杨欣, 等. 基于全寿命周期成本的储能成本分析[J]. *分布式能源*, 2020, 5(3): 34-38.
FU Xu, LI Fuchun, YANG Xin, et al. Cost analysis of energy storage based on life cycle cost[J]. *Distributed Energy*, 2020, 5(3): 34-38.
- [37] 刘文霞, 牛淑娅, 石道桂, 等. 考虑运行策略及投资主体利益的主动配电系统储能优化配置[J]. *电网技术*, 2015, 39(10): 2697-2704.
LIU Wenxia, NIU Shuya, SHI Daogui, et al. Optimal allocation of ADS battery energy storage considering operation strategy and investment subject benefit[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(10): 2697-2704.
- [38] 房宇娇, 李树静, 李宏仲, 等. 考虑广义储能的配电网双层规划研究[J]. *可再生能源*, 2020, 38(11): 1541-1550.
FANG Yujiao, LI Shujing, LI Hongzhong, et al. Research on bi-level planning of distribution network considering generalized energy storage[J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(11): 1541-1550.
- [39] 尚龙龙, 魏碧桢, 王伟, 等. 主动配电网储能动态配置规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(17): 84-92.
SHANG Longlong, WEI Bihui, WANG Wei, et al. A planning method of dynamic energy storage configuration in an active distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(17): 84-92.
- [40] MARI O-SALGUERO J, SCHFER M. A modified normalized weighting factor method for improving the efficiency of the blended high-resolution advection schemes in the context of multiphase flows[J]. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2021, 3(3): 208-225.
- [41] ADETUNJI K E, HOFSAJER I W, ABU-MAHFOUZ A M, et al. Category-based multiobjective approach for optimal integration of distributed generation and energy storage systems in distribution networks[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 28237-28250.
- [42] 陆立民, 褚国伟, 张涛, 等. 基于改进多目标粒子群算法的微电网储能优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(15): 116-124.
LU Limin, CHU Guowei, ZHANG Tao, et al. Optimal configuration of energy storage in a microgrid based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(15): 116-124.

作者简介:



闫群民

闫群民(1980),男,博士,教授,研究方向为电力系统分析与电能质量控制(E-mail: yanqunm@163.com);

穆佳豪(1997),男,硕士在读,研究方向为电力系统分析及新能源发电;

马永翔(1965),男,硕士,教授,研究方向为电力系统规划与分析。

Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration

YAN Qunmin¹, MU Jiahao¹, MA Yongxiang¹, WANG Yong², SUN Yangyang²

(1. College of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. Hanzhong Power Supply Branch of Shaanxi Local Power (Group) Co., Ltd., Hanzhong 723001, China)

Abstract: The wide application of distributed energy storage has effectively solved many problems caused by large-scale distributed generation (DG) access to the distribution network and the rapid increase of load on the planning and operation of the power grid. Distributed energy storage has the characteristics of fast power throughput, high control accuracy, flexible installation, and multi-subject benefits, which can effectively ensure the safety and stability of power supply in the distribution network. The development status of distributed energy storage is sorted out. The advantages and disadvantages of distributed energy storage application modes at home and abroad are analyzed in recent years according to its access location on the DG side, the medium and low voltage distribution network side, the user and the microgrid side. Various mathematical models and optimization algorithms for the optimal configuration of distributed energy storage are compared and analyzed in terms of its location and capacity. Combined with the problems existing in the configuration process of distributed energy storage, the development trend of distributed energy storage is prospected.

Keywords: distributed generation (DG); distributed energy storage; new energy; application mode; location and capacity selection; optimal configuration

(编辑 吴楠)

(上接第 52 页)

The application status and development of laser barrier removal technology in power grid

ZHANG Zhibo¹, WANG Yibo², ZHANG Zikui¹, WANG Huawei³, ZHANG Guixin¹, YOU Zhengjun³

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Grid Huzhou Power Supply Company of Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Huzhou 313000, China;

3. Zhejiang Tailun Power Group Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: Various barriers attached to the transmission line pose a huge threat to the safe and stable operation of the power grid. Traditional barrier removal methods either have safety hazards or consume high energy, and most of them require power outage. With the advantage of high energy and good collimation, laser can be used to shoot down foreign bodies or melt ice without contact from a distance. Therefore, the application status and development of laser barrier removal technology in power grid are sum up. Firstly, the principles of removing different types of barriers such as foreign bodies, ice and tree barriers using laser are summarized. Secondly, the features of several lasers which are commonly used in barriers removal areas are compared. Finally, the effect of some parameters such as laser wavelength, laser power and spot diameter on barrier removal efficiency are analyzed. The safety threshold of power density and irradiation time when lasers irradiate transmission line and insulators are also studied. Laser barrier removal technology is widely used to remove foreign bodies hanging on the lines, but removing ice, tree barriers or other barriers are limited by the removing efficiency and cost. These are still need to be further developed. The related researches and applications of this technology are reviewed in this paper, which can provide a reference for technical personnel in the field of electrical engineering technology.

Keywords: laser; de-icing; removal of foreign body; laser barrier removal; non-contact remove; transmission lines

(编辑 陆海霞)