[分布式光伏]

考虑源网荷协同的分布式光伏储能容量配置方法

文/靖李静
中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司

储能容量配置与电网的运行状态和需求匹配度低，导致电能无法顺利接入电网，进而使弃电率过大，为此研究考虑源网荷协同的分布式光伏储能容量配置方法。首先，深入分析分布式光伏系统的运行特性和需求，确定储能设备的功率需求，为后续容量配置提供基础数据。其次，在源网荷协同的框架下，对储能装置的能量状态进行灵活调整，以应对不同场景下的能量需求和波动。最后，建立分布式储能多目标模型，综合考虑多个因素，实现储能容量的优化配置。实验结果表明，随着场景数的增加，该方法的优势愈发明显，在100个和150个场景数下，弃电率分别比文献[1]方法和文献[2]方法低更多。该方法在容量配置和弃电率控制方面表现出更好的效果，能够更有效地利用分布式光伏系统的能源，减少能源浪费。

分布式光伏作为一种清洁、高效的能源形式，正日益受到广泛关注和应用。然而，分布式光伏的随机性和间歇性特点，给电力系统的稳定运行带来了挑战。为解决这一问题，储能技术被引入到分布式光伏系统中，通过储能设备的充放电调节，提高电力系统的可靠性和经济性。文献[1]通过优化算法来寻找光伏与储能系统的最佳容量配置，旨在提高系统的经济性和运行效率。该文献重点关注算法的改进及其在优化配置中的应用，但在处理弃电率问题方面，没有深入考虑不同场景下的容量配置对弃电率的具体影响，也未能提供详细的弃电率数据分析和比较。文献[2]分析户用分布式光伏的特性，并探讨如何通过合理的储能容量配置来优化系统的运行。然而，该文献同样在弃电率控制方面存在不足，未能全面考虑不同场景下的容量配置对弃电率的影响，也未给出在不同场景下弃电率的详细分析和比较结果。

为降低弃电率，本文研究考虑源网荷协同的分布式光伏储能容量配置方法。源网荷协同是分布式光伏储能容量配置的核心思想之一。在这一框架下，源（分布式光伏）、网（电力系统网络）和荷（电力负荷）三者之间形成一个动态的互动关系。储能设备在源网荷之间起到桥梁作用，通过合理的充放电策略，平衡电源与负荷之间的供需关系，实现电力系统的优化运行，研究考虑源网荷协同的分布式光伏储能容量配置方法具有重要的理论意义和实践价值。

确定分布式光伏储能设备的功率需求

在考虑分布式光伏储能容量配置方法时，本文首先必须明确分布式光伏储能设备的功率需求，它直接关系到后续储能装置能量状态的调整以及分布式储能建模的实现。

对功率需求的准确预估，能够确保储能设备在合理范围内进行充放电，从而延长其使用寿命，光伏发电功率可通过如下模型计算

$$\begin{cases} P = I_t \eta f + W \\ I_t = \tilde{I}_t + \Delta I_t \end{cases} \tag{1}$$

式中，I_t为预测的t时刻下光伏光照辐射强度；$\tilde{I}_t$为历史光伏光照辐射强度数据；ΔI_t为光辐射强度预测误差；η为光电转换系数；f为光伏辐射总面积。

光伏发电功率的变化主要受太阳辐射强度的影响，并与之呈正相关关系[3]。在确定功率需求时，还应充分考虑分布式风电光伏放电功率损耗和充电功率损耗，以确保储能设备能够在满足功率需求的同时，保持较高的运行效率。

分布式光伏充、放电功率损耗如式（2）所示。

$$W = \sum_{t=1}^{24} (S^- + S^+) \tag{2}$$

式中，t为从1～24 h的时间；S^-为分布式风力发电系统的功率能量损失；S^+为风力发电系统的荷电损失。

考虑源网荷协同的储能装置能量状态调整

储能装置的能量状态调整，实际上是对其充放电策略进行精细化控制的过程。当电网负荷处于低谷、光伏发电量超过实际需求时，使用能量存储设备来给电池充电，把过剩的电量存储在电池中；而当电网负荷高峰来临、光伏发电量不足以满足需求时，通过储能装置的放电来补充电能，从而平衡源、网、荷三者之间的能量流动，缓解电网压力，考虑源网荷协同的配网侧储能系统框架如图1所示。

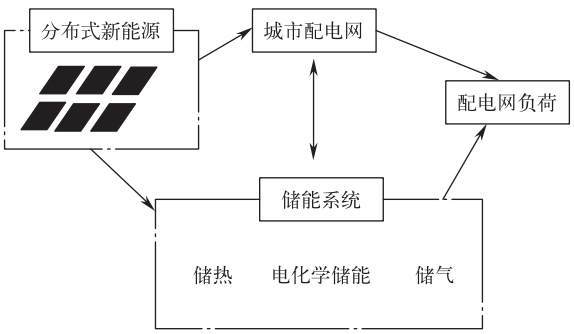

图1　考虑源网荷协同的配网侧储能系统框架

为更直观地对配电网侧储能系统中储能设备的能耗状况进行监控，本文拟设置三个临界值，将其分为非工作区、工作区和警戒区三个区域[4]。如图2所示。

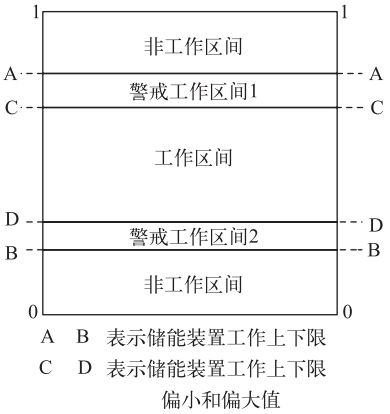

图2　储能装置状态分区

从图2可以看出，非工作区间是储能装置处于完全充电或完全放电状态时的区域，此时储能装置无法进行充放电操作；工作区间则是储能装置可以正常进行充放电操作的区域，其能量状态在此区间内波动；而警戒工作区间则是介于非工作区间和工作区间之间的一个过渡区域，当储能装置的能量状态进入此区域时，需要提前进行预警，避免其进入损耗或饱和状态[5]。

当能量存储设备的能源状况在警报操作范围的上下限和下极限之间时，储能装置处于正常的工作状态，可以进行正常的充放电操作。此时，应根据源网荷的实时需求调整储能装置的充放电策略，以实现协同优化。

建立分布式储能多目标模型实现配置

基于前面确定的功率需求和能量状态调整策略，本文可以构建出符合实际需求的分布式储能多目标模型。这一模型不仅能够准确反映储能装置的物理特性，还能够模拟出在不同运行场景下储能装置的工作状态。首先确定最大效益优化目标为

$$\max F = C_w + C_h - C_p - C_b \tag{3}$$

式中，C_w为光伏阵列的发电收益；C_h为储能器的发电收入；C_p为燃料电池需要的电力消耗（也就是由主电网向燃料电池提供电力的费用）；C_b为氢气储罐的操作费用。

为确保光伏发电量的稳定输出，将光伏发电估计量的越线概率以罚函数的形式体现在目标函数中。通过迭代计算，找到使目标函数最小的控制变量，从而确定最优的储能装置容量[6]。

$$\min G = k\Delta q_c + \rho\sum\left(\frac{P_U - P_{V\lim}}{U_{\max} - U_{\min}}\right) \tag{4}$$

$$q_c = q_{\min} + q_0\Delta q \tag{5}$$

式中，k为存储容量约束函数；ρ为罚函数因子；$P_{V\lim}$为光伏发电估计量越限的最大概率限制值；U为电压；P_U为光伏发电估计量越限的基础概率；q_c为单位储能成本；Δq为储能装置容量的变化量；q_0为单位容量。

通过以下映射关系将离散的变量连续化，以表示储能装置容量。

整体分布式储能多目标模型即为上述之和的最小值

$$\min Z = \max F + \min G \tag{6}$$

根据原始数据初始化迭代次数，并计算适应度值。通过限制适应度值在约束范围内，并将电压越限概率引入目标函数中，确保模型的准确性和实用性。当达到最大迭代次数后，根据终止条件判断输出结果，记录最优的储能容量配置，以此完成储能容量的配置。

实验分析

1. 实验准备

以IEEE33系统为例，将三台额定容量为600 kW、300 kW、300 kW的光伏机组置于30节点、14节点以及17节点，储能位于1号节点，布置于上级联络节点变压器的10 kV电压侧，节点1与外部电网相连，32节点变压器存在重满载问题，在该位置与下级电网相连的变压器位置布置储能，缓解变压器的重满载问题。其基本结构如图3所示，该系统参考电源为10 MW，参考电压为12.66 kV，电网总有功功率为5 084.26 kW，两台机组的容量都是4.3 MW，蓄电池组的充电/放电效率分别是0.95、0.89，最大安装点数为3；负荷节点电压上、下界分别为0.9（pu）、1.05（pu），无一节点电压越界。

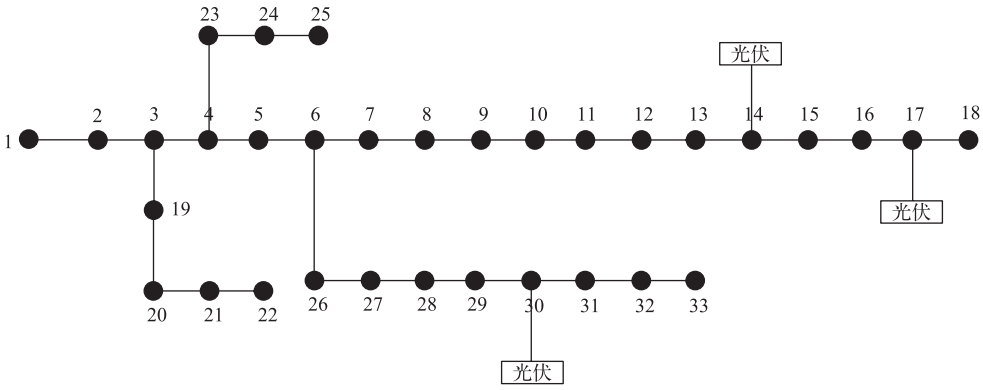

图3　IEEE33节点配电系统

本文采用弃电率来评价容量配置方案的可靠性，弃电率能够直观地反映分布式光伏系统在实际运行中的能源利用效率。通过测量和分析弃电率，可以评估当前储能容量配置方法的有效性。弃电率计算公式为

$$\varphi = \frac{\sum_{t\in T} P_{CP}(t)}{\Delta P^{+}(t)} \times 100\% \tag{7}$$

式中，$P_{CP}(t)$为t时刻的储能配置弃电功率；$\Delta P^{+}(t)$为t时刻净负荷功率缺额和盈余值。

实验软硬件环境：配备Intel Xeon E5-2680v4处理器，64GB DDR4 ECC内存，2TB SATA硬盘；操作系统为Windows10专业版。仿真软件选择MATLAB，用于搭建和仿真IEEE33系统模型；MATLAB编程环境，编写算法和数据分析脚本；电力系统分析软件为PSS/E，分析电力系统潮流。

实验将基于上述软硬件环境和配置细节进行，保证实验结果的准确性和可靠性。

2. 实验结果与分析

为验证本文方法的效果，将其与文献[1]和文献[2]进行对比，比较三种不同方法在不同场景数下的容量配置结果及其对弃电率的影响，见表1。

本文方法在不同场景数下的容量配置后，其弃电率均低于文献[1]方法和文献[2]方法。具体来说，在50个场景数下，本文方法的弃电率为9.8%，比文献[1]方法的12.5%低2.7个百分点，比文献[2]

方法的13.0%低3.2个百分点。随着场景数的增加，本文方法的优势愈发明显，在100个和150个场景数下，弃电率分别比文献[1]方法和文献[2]方法低更多。

表1　3种方法下不同场景数的容量配置结果及弃电率

方法	场景数/个	能量容量/(kW·h)	功率容量/kW	可控电源容量/kW	弃电率(%)
文献[1]方法	50	1 600.0	1 000.0	90.0	12.5
	100	1 700.0	1 100.0	95.0	11.0
	150	1 800.0	1 200.0	100.0	10.0
文献[2]方法	50	1 550.0	950.0	85.0	13.0
	100	1 650.0	1 050.0	92.5	11.5
	150	1 750.0	1 150.0	97.5	10.5
本文方法	50	1 794.4	1 183.3	103.8	9.8
	100	1 894.4	1 283.3	113.8	9.2
	150	1 994.4	1 383.3	123.8	8.8

研究表明本文方法在容量配置和弃电率控制方面表现出更好的效果，能够更有效地利用分布式光伏系统的能源，减少能源浪费，提高系统的能源利用效率和稳定性。

结束语

在本文的研究中，取得一系列显著的效果，该方法有效地提升分布式光伏系统的能源利用效率，实现源网荷之间的协同优化。通过合理配置储能容量，提高供电的可靠性和稳定性。然而，必须正视该方法存在的不足。不同地区的资源条件、用电需求等因素差异较大，这给储能容量的配置带来了挑战。展望未来，将积极探索适用于不同地区的储能配置方案，以提高系统的经济性和效率。EA

（收稿日期：2024-10-15）

参考文献

[1] 胡祖源，靳现林，谭雅之，等．基于改进粒子群算法的分布式光伏及储能系统优化配置[J]．综合智慧能源，2023，45(1)：49-57．

[2] 赵雅洁，薛田良，张磊，等．考虑户用分布式光伏的负荷聚合商自建储能的容量配置[J]．现代电子技术，2024，47(8)：131-137．

[3] 王勇，刘梦晨，王辉，等．计及源网荷储协同运行的城市配网侧储能系统规划调度[J]．电工电能新技术，2024，43(3)：73-82．

[4] 郁丹，吴君，唐人．考虑节能减排的分布式光伏储能容量配置研究[J]．自动化仪表，2024，45(3)：113-117+122．

[5] 赵瑞锋，郑文杰，余志文，等．基于合作博弈的光伏产销者分布式储能容量优化配置[J]．可再生能源，2023，41(10)：1391-1400．

[6] 李勇，姚天宇，乔学博，等．基于联合时序场景和源网荷协同的分布式光伏与储能优化配置[J]．电工技术学报，2022，37(13)：3289-3303．