风光储系统储能容量优化配置策略研究

文/王红星
中国石油集团电能有限公司战略发展部

以风电和光伏发电并网为研究对象，分析了风光储系统的结构和运行特性。建立了储能系统的充放电模型，对储能系统进行了优化配置。研究结果表明，该优化配置方法可在满足系统运行要求的前提下，提高风光储系统的利用率和稳定性，从而使储能系统在运行过程中获得最大经济效益。

由于风电和光伏发电出力具有随机性、波动性和间歇性等特点，造成弃风弃光现象严重，因此需要配置储能装置来平抑风电和光伏发电的波动。在风光储系统中，储能装置主要负责对可再生能源出力进行平抑，方式包括平滑输出功率、提供备用电源及提供充放电控制等。为了实现对风光储系统的优化控制，首先要对储能装置进行优化配置，根据其在系统中的运行特性及影响因素确定最优的储能容量配置方案。目前已有大量关于储能系统容量配置的研究工作，但很多研究都是基于理想的数学模型进行的，很难反映实际运行中存在的不确定性因素。此外，现有研究多采用离线优化算法进行储能系统容量配置，计算效率相对较低且容易出现局部最优解。因此提出一种在线优化算法对储能系统容量进行优化配置具有重要意义。

本文提出了一种基于动态规划的储能容量优化配置方法。首先建立了储能系统的数学模型，以弃光电量最小为目标函数，以单位时间内的弃光量和储能成本为约束条件，对储能系统进行优化配置。然后对风光储系统中不同类型设备的容量配置进行研究。基于所建立的储能容量优化配置模型，采用动态规划方法对风光储系统中不同类型设备和不同运行工况下的容量进行了优化配置，并采用算例仿真验证了所提方法的有效性和合理性。本文研究内

容可为风光储系统的优化配置提供一定参考。

风光储系统结构及运行特性

风电和光伏发电过程中会产生一定的能量损耗，某风力发电机功率输出曲线如图1所示。风电和光伏发电系统的功率输出曲线可以通过风电场和光伏电站的实际功率进行拟合，从而得到风电场和光伏电站的有功功率、无功功率及弃光电量等曲线。由于风电场和光伏电站具有周期性，在风力和光电不稳定的情况下，会出现弃风或弃光现象，对电力系统安全、稳定运行造成严重影响。因此，需要在电力系统中设置储能设备，以减少风电和光伏发电并网对电力系统稳定性的影响，提高电力系统稳定性。

储能设备是以蓄电池为主体，通过充放电控制策略及相应的控制算法，有效地将风光发电产生的能量进行存储。在实际应用中，由于风力和光伏发电在昼夜、季节、天气等因素影响下存在一定的波动性，因此需要设置储能装置对其进行充放电控制。当风电和光伏发电功率与负荷需求存在较大偏差时，储能装置对其进行充放电操作，以降低风电和光伏发电功率波动对电网运行带来的不利影响。储能装置除了可调节风电和光伏发电功率波动外，还可以调节负荷需求。当电网出现无风或无光时，需要减小负荷需求以减少弃光电量；当电网出现风或光电时，需要增加负荷需求以满足电力系统运行要求。因此，在储能装置充放电过程中需考虑负荷变化对充放电的影响。当储能系统在满足用户需求的前提下得到最大经济效益时，需要分析储能装置的运行特性及充放电过程中的能量损耗。

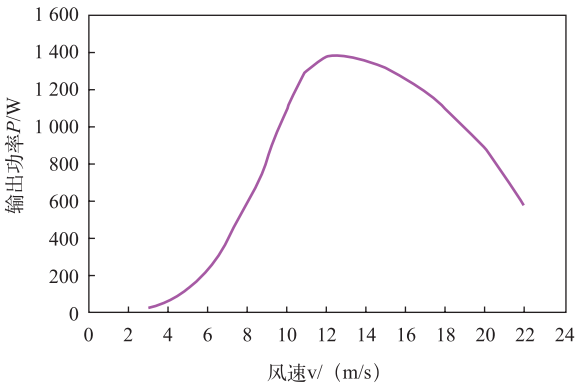

图1　风力发电机功率输出曲线

双层决策问题

储能系统的运行成本包括初始投资成本和运行维护成本，初始投资成本为储能系统安装容量配置时的投资，运行维护成本为储能系统运行过程中的维护和检修费用。随着储能技术的发展，储能系统的价格逐渐降低，但储能系统在运行过程中因不合理使用而造成的能量浪费仍不可避免，因此在运行过程中的节能降耗问题不容忽视。

以风光储系统为研究对象，将风光储系统分为上层和下层。上层以最大弃光电量为目标函数，下层以储能成本最低为目标函数。上层决策主要针对电网公司在制定弃光电量的相关政策时所面临的经济性问题；下层决策主要针对风光储系统自身在满足系统运行要求的前提下对储能设备进行优化配置问题。为了简化分析过程，将弃光电量和储能成本等变量都设定为常数。本文以弃光电量最小为目标函数，采用双层决策方法进行优化配置。首先采用模糊层次分析法（FAHP）建立弃光电量和储能成本之间的模糊层次结构，然后将弃光电量、储能成本和储能容量三者作为模糊判断矩阵，对弃光电量进行综合评估，再通过模糊层次分析法确定各层决策变量的权重系数。由于下层决策者对上层决策变量权重系数的决策可能与上层决策者相同，也可能不同，因此将下层决策者对上层决策变量权重系数的决策视为下层决策者对上层决策变量权重系数的决策。以弃光电量和储能成本为双层目标函数，构建双层决策模型如图2所示。

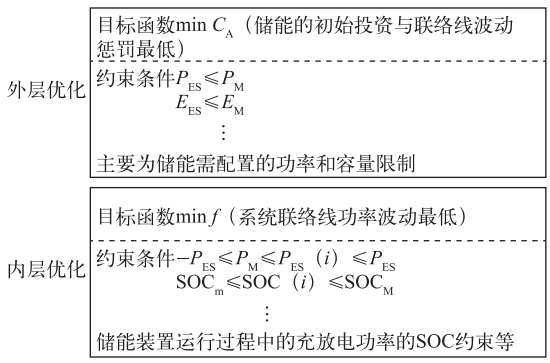

图2　双层规划模型架构

储能配置模型

本文以弃光电量和储能成本作为优化目标，对储能系统进行容量配置。弃光电量指一天内并网运

行的风电和光伏发电的总发电量与输入到电网的电量之比，弃光电量越大，弃光率越高，因此需要配置更多的储能容量。储能系统的成本主要包括运行维护成本、充电成本和放电成本。其中，充电成本指储能系统在充、放电过程中所消耗的电能；放电成本指储能系统在充电能；运行维护成本主要包括储能设备的日常维护费用，如更换电池或蓄电池等，也包括故障维修费用；充电成本主要指用户在使用储能设备时所支付的费用，一般情况下，充电电费按实际电价进行计算。

1. 外层模型

目标函数为

$$\min T_{\mathrm{A}}=P_{\mathrm{ES}}+E_{\mathrm{ES}}+\lambda\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left[P_{\mathrm{ES}}(i)+P_{\mathrm{L}}(i)-P_{\mathrm{G}}(i)-P_{\mathrm{base}}\right]^2}$$

式中，P_{ES}为风光储能配置功率；E_{ES}为储能配置容量；λ为惩罚系数；$P_{\mathrm{ES}}(i)$、$P_{\mathrm{L}}(i)$和$P_{\mathrm{G}}(i)$分别为系统内的储能功率、负荷功率和发电功率；P_{base}为基准容量。

以单位弃光电量最小为目标，建立外层优化模型。外层模型中，首先利用负荷需求曲线对风光储系统的发电量进行预测。然后将预测数据代入外层模型，求出储能系统的充放电功率，并根据此功率对储能系统的充放电过程进行规划。为了获得储能系统最佳运行效果和经济性，须进一步确定优化配置后的最优运行策略。在确定优化策略后可得到最优运行策略，在优化策略中可通过改变弃光电量和蓄电池充放电功率来达到最终目的。

2. 内层模型

目标函数为

$$\min F_{\mathrm{A}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[P_{\mathrm{ES}}(i)+P_{\mathrm{L}}(i)-P_{\mathrm{G}}(i)-Q\right]^2 \tag{2}$$

$$Q=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[P_{\mathrm{ES}}(i)+P_{\mathrm{L}}(i)-P_{\mathrm{G}}(i)\right] \tag{3}$$

式中，Q为线路功率平均值；i为计算时段（i=1,2,…,N）。

风力发电系统的输出功率与风力的大小成正比，且风速越大，输出功率越大。根据不同风速下风力发电机输出功率的规律，在风速最大时，输出功率达到最大。另外，当光照强度较强时，光伏发电系统可通过太阳能电池板将太阳光转化为电能；当光照强度较弱时，光伏发电系统将无法提供电能。蓄电池储能系统与风力发电机和光伏发电系统构成一个互补的能源转换体系，蓄电池作为储能装置进行充放电管理，风力发电机和光伏发电系统作为能源转换体系向电网提供电能。当风力发电机无法输出功率时，由蓄电池对其进行充放电管理；当太阳能电池板无法提供电能时，由蓄电池对其进行充放电管理。

3. 储能容量配置方法

储能系统的主要功能是储存电能，其成本主要受储能容量和放电时间的影响。合理选择储能系统的容量，既可以提高电力系统的可靠性，又可以提高系统的经济效益。因此，储能系统容量的选择至关重要。在本文中，为满足光伏发电接入电网后对并网风电的影响，储能系统在满足逆变器不停机运行要求的前提下，最大限度地利用储能系统存储电能。同时，为了减少弃光电量和提高电能利用率，提出了一种基于弃光电量和储能成本为目标函数的储能容量优化配置方法。根据光伏发电和风力发电对弃光电量的影响程度不同，将弃光电量分为可忽略值和可接受值两类。考虑到风光储系统可以有效提高光伏发电和风力发电并网后对电网的影响程度，因此在设定弃光电量指标时采用可忽略值；考虑到光伏发电、风力发电和储能系统均采用放电模式进行充放电，因此在设定弃光电量指标时采用可接受值。根据弃光电量和储能成本计算目标函数，可以看出目标函数中只含有弃光电量指标与储能成本两个变量。

算例分析

以某实际光伏电站为例，运行在设定的工况下，风光储系统结构如图3所示。为便于分析，以风电场弃风电量和风光储系统成本最小为目标函数，对光伏电站储能系统进行容量配置。配置过程中，取风电机组有功功率变化曲线的均值作为风电场运行状态的指示。结果表明，储能系统容量为100 kW时，与未配置储能系统的情况相比，弃风电量降低39.4%；与配置了储能系统的情况相比，弃风电量降低61.3%。采用本文提出的方法对风光储系统容量进行优化配置后，光伏电站的弃光电量得到明显降低。其中在风光储系统容量为100 kW时，弃光量为11.4 MW；在风光储系统容量为150 kW时，弃光量为24.1 MW。可见本文提出的方法可以有效降低弃光电量，提高光伏电站利用率。同时也

证明了本文所提方法在储能容量优化配置方面具有可行性和有效性。

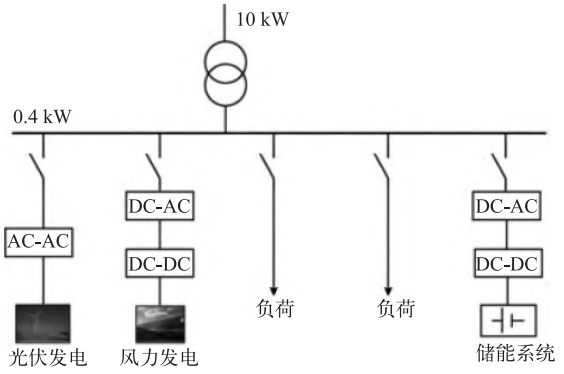

图4　风光储系统结构图

结束语

本文对风光储系统进行了结构分析和运行特性分析，建立了储能系统的充放电模型，提出了一种储能容量优化配置方法。采用该方法对风光储系统的储能容量进行优化配置，在满足系统运行要求的前提下，得到了储能系统的最优配置容量和弃光电量最小化的优化配置结果。通过对比分析风光储系统在不同运行状态下的储能容量配置结果，发现当光伏出力功率较小时，储能系统能够满足风光储系统运行要求；当光伏出力功率较大时，储能系统无法满足风光储系统运行要求。**EA**

（收稿日期：2023-06-30）

参考文献

[1] 王枫，张辉，周斌．含分布式储能的区域电网多时间尺度优化调度策略[J]．电气应用，2022，41(10)：89-96．

[2] 陈玲，张祎，徐林，等．基于扫描法的海上风电场集电系统拓扑优化[J]．电气应用，2022，41(8)：88-94．