

计及预测精度及拓扑结构的光伏电站储能经济配置

张江林^{1,2}, 高红均¹, 王家怡¹, 洪居华¹, 刘俊勇¹, 庄慧敏²

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 成都信息工程大学 控制工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:光伏电站并网离不开储能系统的支持,为了提高储能配置的精度并降低储能系统的成本,考虑到现有研究的不足,分析了光伏电站出力预测算法误差、储能拓扑结构对储能配置的影响。提出了一种储能的快速配置方法,分析了预测算法误差对储能定容的影响,完善了储能的收益模型;引入了一种双元互补的储能拓扑结构,并分析了该拓扑结构对电池特性以及储能成本模型的影响;建立了以最大经济效益为目标的总投资收益模型,并基于某光伏电站的实际数据确定其最优配置方案。算例结果表明,预测算法误差会引起储能容量及功率增大,从而导致储能系统的成本增大;引入所提储能拓扑结构能有效地提高电池的使用寿命,降低储能系统的成本。

关键词:光伏电站;储能系统;拓扑结构;预测精度;成本;容量配置

中图分类号:TM 615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.017

0 引言

随着对太阳能利用的不断深入,其利用方式也逐渐多样化,包括广泛应用于农村的屋顶光伏系统^[1]、为多种智能园区提供电力支持的光伏微网系统^[2]、参与系统调度的光伏电站^[3]等。其中,光伏电站具有建设周期短、环境污染低、能源质量高等特点,是我国目前鼓励力度最大的绿色电力能源开发项目。

然而,参与电网调度对发电系统的出力水平具有严格的要求,其中最重要的是需要具备稳定的输出。光伏电站由于太阳能的特性,其输出天然具有间歇性及波动性的特征,因此必须在并网前平抑其功率波动^[4-5]。此外,调度中心以光伏电站的预测功率作为其调度功率,考虑到以目前预测算法的精度,其预测值必然存在误差,这将造成输出功率与调度功率不匹配的问题^[6]。

储能系统具有源荷二重性,其在改善电能质量、平抑功率波动等方面发挥着重要的作用,这使得其成为解决光伏电站并网问题的重要手段。然而储能的价格昂贵,如何进行合理的储能容量配置具有重要的研究价值。目前关于储能定容的研究主要分为以下2个方面。

a. 以平抑波动为目的的策略方法制定。该方面的研究主要通过指标变化、过程指令及元器件控制等方式实现功率波动平抑,方法包括频谱分析法^[7]、时间常数法^[8]、滑动平均法^[9]、调频调参法^[10]等。

文献[7]利用离散傅里叶变换对输出功率进行频谱分析,从而选取储能系统的最小容量,该方法的难点在于如何确定补偿频段;文献[8]通过预先控制端电压的方式对功率进行修正,但该方法的时间常数等参数设置过于简单;文献[9]将加权移动平均滤波法与模糊控制相结合,通过实时调整储能系统的荷电状态来平滑功率波动,但是该方法仅基于当前时刻进行控制,没有考虑荷电状态对未来时刻储能充放电功率的影响;文献[10]通过爬坡率来控制储能的充放电功率,以此实现平抑功率波动的目的,然而该方法忽视了电池的荷电状态,易导致电池的过充/过放;文献[11]采用双电池结构来平滑功率的正负波动,然而其未对该结构的优势进行进一步的数据分析。

b. 以经济性为原则的多目标优化决策。该方面的研究主要以储能容量为目标之一,与其他经济性指标共同构建多目标优化函数,并利用智能算法进行求解以确定最佳储能容量。文献[12]以微网的经济调度为目的,建立了蓄电池的容量优化模型,通过最低综合成本来确定储能容量,但是并没有考虑电池寿命对储能成本的影响;文献[13]将微网的最大允许连续离网时间等极端参数值作为指标,可在不进行大量时域仿真的情况下确定储能的最小容量,该方法虽然简单、易行,但不利于进行经济性分析;文献[14]建立了以储能装置年均费用为目标函数、以系统可靠性指标为约束的储能容量优化模型;文献[15]以装置成本低、功率匹配佳、输出功率平滑度高为目标建立储能容量优化模型,并利用基于自适应惯性权重的粒子群优化算法进行求解,但该方法的投资收益模型不够完善,且未考虑储能接入所带来的经济效益。

综上所述,近年来对于平抑实际系统输出功率波动的研究很多,但涉及平抑预测算法误差引起的

收稿日期:2018-12-28;修回日期:2019-03-25

基金项目:国家自然科学基金重点项目(5143000228);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(YJ201750)

Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(5143000228) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(YJ201750)

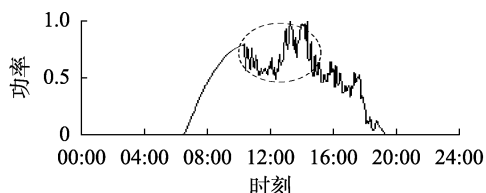
功率差额的研究很少,然而这却是在并网条件下确定光伏电站储能系统的容量时不可忽视的一个问题。此外,储能系统的成本核算在许多关于储能经济配置的研究中都有所涉及,大多都将电池寿命考虑在内,但是却很少有涉及提高电池寿命的策略及其经济性评估的研究。考虑到现有研究的不足,本文分析了预测精度对储能定容的影响,并建立了光伏电站的收益模型。同时,引入一种双元互补的储能拓扑结构,该结构将有效地提高储能电池的使用寿命,进一步分析其经济效益,从而完善储能系统的成本核算。最后根据所提收益及成本模型,建立以最大储能功率及容量为约束、以经济效益最大化为目标的投资收益模型,得到储能的最优配置方案。

1 储能收益模型及预测误差修正

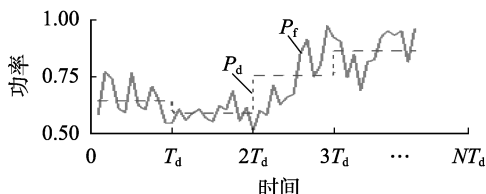
1.1 储能收益模型

图 1(a) 为某光伏电站的日出力曲线,图 1(b) 为图 1(a) 中虚线圈出部分的波动曲线放大图(图中功率为标么值)。图中 P_f 为实际出力功率, P_d 为目标平抑功率,将时间 T 划分为 N 个平抑区间,每个区间的时间长度为 T_d 。相应的待平抑功率波动 P_b 的表达式如式(1)所示,其对应的曲线如图 2 所示(图中 P_b 为标么值)。

$$P_b = P_f - P_d \quad (1)$$



(a) 日出力曲线



(b) 部分放大图

图 1 光伏电站的功率曲线

Fig.1 Power curves of photovoltaic power station

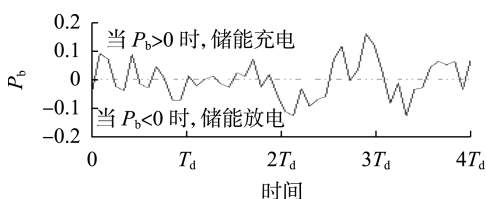


图 2 待平抑功率波动曲线

Fig.2 Curve of power fluctuation to be smoothed

为了符合调度要求以实现光伏电站的安全并网,需要加装储能系统来平抑图 2 所示的功率波动

曲线。当 $P_b > 0$ 时,表示功率正向波动,此时储能系统充电;当 $P_b < 0$ 时,表示功率反向波动,此时储能系统放电。储能系统的具体策略如图 3 所示。图中, P_{ES} 、 E_{ES} 、 $P_{ES}^{\max}$ 、 $E_{ES}^{\max}$ 分别为储能的功率、容量、功率最大值、容量最大值。

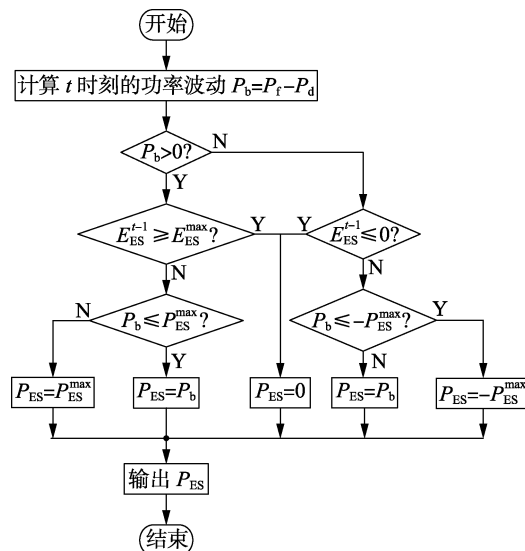


图 3 储能系统的工作策略

Fig.3 Operation strategy of energy storage system

为了完全平抑光伏电站的功率波动,根据图 2, $P_{ES}^{\max}$ 、 $E_{ES}^{\max}$ 可分别通过式(2)、(3)求得。

$$P_{ES}^{\max} = \max_T \{ |P_{\max(i)}|, i=1, 2, \dots, N \} \quad (2)$$

$$E_{ES}^{\max} = \max_T \left\{ \int_0^T P_b(\tau) d\tau \right\} \quad (3)$$

其中, $P_{\max(i)}$ 为调度区间 i 的最大功率波动; $P_b(\tau)$ 为 τ 时刻的瞬时功率波动值。

若要求储能系统在任何情况下都能平抑功率波动,则容易造成储能容量过大,导致成本过高,从而影响系统的投资建设。因此应根据实际运行需求及收益情况来确定储能的容量配置。光伏电站安装储能系统产生的收益主要来源于 2 个方面:消纳电量 E_{XN} 所产生的收益及上网电量 E_{SW} 所产生的收益。前者反映储能系统对富余光伏电量的利用情况,后者反映改善电能质量后光伏电站的并网出力情况。以储能系统 $E_{ES} = E_{ES}^{\max}$ 为例, E_{XN} 和 E_{SW} 的表达式为:

$$E_{XN} = \int_0^T P_b(\tau) d\tau - \sum_{i=1}^N \int_{T_d(i)} (P_b(v) - P_0) dv \quad (4)$$

$$E_{SW} = P_d TL(P_0) \quad 0 < P_0 < P_{ES}^{\max} \quad (5)$$

其中, $T_d(i)$ 为调度区间 i 的时间长度; $L(P_0)$ 为当储能系统的功率是 P_0 时,光伏电站电量上网的概率,其大小可由图 4 确定。

图 4 为在 $E_{ES} = E_{ES}^{\max}$ 的情况下储能功率 P_{ES} 与电量上网累计概率分布的关系图,对于任意的 $|P_0| <$

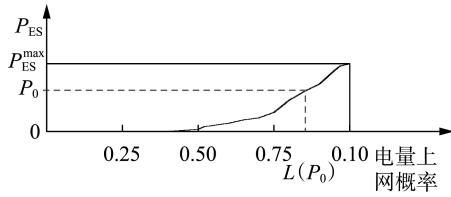


图4 储能功率与电量上网累积概率分布的关系

Fig.4 Relationship between energy storage power and cumulative probability distribution of on-grid energy

$P_{ES}^{\max}$ 都可得到相应的电量上网概率,从而确定上网电量。同样地,当 $P_{ES} = P_{ES}^{\max}$ 时,以电量上网概率为条件,可获得相对应的储能容量。配置储能系统后,光伏电站的收益模型为:

$$B_{rf} = (E_{sw} + E_{xn})p \quad (6)$$

其中, p 为光伏上网电价; B_{rf} 为光伏电站的收益。相较于一般的最优配置方法而言,这2种方法不需要同时优化2个变量,而是先确定其中的1个变量,然后求得另一个变量,这样简化了繁琐的优化计算过程,可以帮助用户在配置储能系统初期对配置方案及收益情况有大致且直观的认知,在许多场景下便于用户进行分析。最优储能配置方法将在后文介绍。

1.2 预测误差修正

不同的预测算法有着不同的效率,然而实际中由于太阳水平总辐照度、温度、湿度等可能发生不可预知的变化,到目前为止,效率再高的算法仍然无法避免预测出现误差。因此以预测曲线作为目标进行平抑得到的输出曲线可能仍然不满足并网要求,造成光伏电站的经济损失。考虑预测算法误差的情况下,实际功率平均值与预测功率平均值的对比如图5所示(图中功率为标么值,后同)。

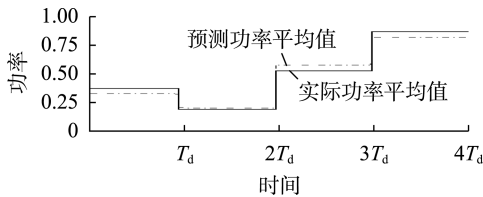


图5 实际功率平均值与预测功率平均值的对比

Fig.5 Comparison between average value of real power and predictive power

由图5可知,预测误差的存在将导致实际功率平均值与目标功率不同,从而使储能系统需平抑的功率波形产生变化,如图6所示。

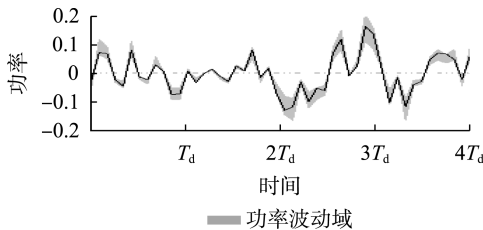


图6 实际功率缺额波动域

Fig.6 Fluctuation range of actual power shortage

图6中的功率波动域表示由预测误差导致的预测功率曲线与实际功率曲线的差异范围。根据图6及式(2)可知,在考虑预测误差的情况下,储能的最大功率值将增大,因此需对储能的功率进行修正,修正表达式如下:

$$P_{ES,XZ}^{\max} = \max \{ |P_{\max(i)}| + |e_f P_d|, i=1, 2, \dots, N \} \quad (7)$$

其中, e_f 为预测算法的误差; $P_{ES,XZ}^{\max}$ 为修正后的储能最大功率; $|e_f P_d|$ 为功率增加部分的极值。根据式(3)、(7)可得到储能容量的修正值 $E_{ES,XZ}^{\max}$, 其表达式为:

$$E_{ES,XZ}^{\max} = \max_T \left\{ E_b(t) = \int_0^t (P_b(\tau) + |e_f P_d|) d\tau \right\} \quad (8)$$

2 储能成本模型及拓扑结构分析

2.1 储能成本模型

储能系统的成本 C_T 主要包括投资成本 C_{IN} 、运行维护成本 C_{OM} 以及电池更换成本 C_{RE} 。相应的表达式如下^[16]:

$$C_T = C_{IN} + C_{OM} + C_{RE} \quad (9)$$

$$C_{IN} = M_p P_b + M_E E_b \quad (10)$$

$$C_{OM} = \frac{C_{OM}^{an}}{D_s} \left[1 - \frac{1}{(1 + D_s)^T} \right] \quad (11)$$

$$C_{RE} = \sum_{j=1}^K \frac{C_{RE}^{in}}{(1 + D_s)^{jL_f}} \quad (12)$$

其中, M_p 为单位储能充放电功率的安装价格,单位为元/MW; M_E 为单位储能容量的安装价格,单位为元/(MW·h); C_{OM}^{an} 为储能系统的年均运行维修费用,其大小与需维护的储能容量大小有关; C_{RE}^{in} 为初始更换电池的费用; D_s 为贴现率; K 为运行时间 T 内更换电池的次數; L_f 为电池的使用寿命。

由式(9)~(12)可知,储能系统的成本不仅与储能的配置功率 P_{ES} 、容量 E_{ES} 有关,还与电池的寿命相关。影响电池寿命的因素包括充放电循环次数、放电深度(DoD)以及电极材料等^[17]。其中,放电深度是影响电池寿命的主要因素,它表示电池释放的容量占额定容量的百分比。放电深度越大,则电池的寿命越短。然而,为了平抑功率波动,储能电池需要在短时间内进行大量深浅不一的充放电循环,这将严重降低电池的使用寿命,造成储能系统的成本增加。

2.2 储能系统拓扑结构及其经济性分析

为了解决上述问题,本文引入一种双元互补的储能拓扑结构,如图7所示。

不同于传统的单一储能电池的结构,该结构由2个容量、功率完全相同的电池组分别通过多端口转换器连接到直流线路构成。当功率发生正向波动

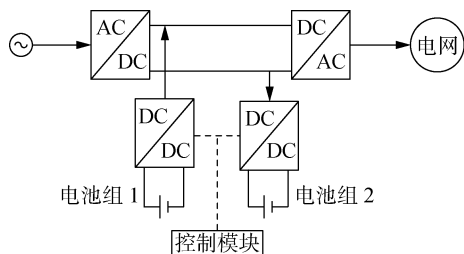


图 7 双元互补的储能系统拓扑结构

Fig.7 Topological structure of energy storage system with dual complementary units

时,控制模块发出信号,令处于充电状态的电池组工作;当功率负向波动时,控制处于放电状态的电池组工作。若运行过程中检测到任一组电池处于满充或满放状态,则立刻切换两者的充放电状态,确保两者始终工作在相反的状态。这种状态切换策略可能会导致储能电池经历不完整的充放电循环,从而影响到使用寿命。根据文献[18-21]的结果与分析,光伏出力的预测误差服从正态分布,其中文献[20]给出了其概率函数,具体如式(13)所示。由式(13)可知,光伏电站的实际出力与目标功率之间的缺额服从期望值为 0、标准差为 σ 的正态分布,说明光伏的实际功率相较于目标功率的正、负向波动的概率与能量接近,因此状态切换导致的循环寿命减少的幅度将很有限,相较于传统的储能装置在短时间内进行大量的循环,该结构能有效保证电池组进行较完整的充放电循环,其工作效果如图 8 所示。

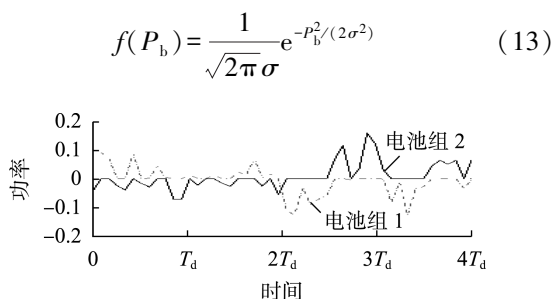


图 8 储能电池的工作状态

Fig.8 Operation states of energy storage batteries

当输出功率高于平抑目标功率时,电池组 1 进行充电,当输出功率低于平抑目标功率时,电池组 2 进行放电,保持两者的工作状态(即当发生正向功率波动时,电池组 1 工作;当发生负向功率波动时,电池组 2 工作)直至检测到某一组电池满充或满放后,转变工作状态,即电池组 1 进入放电状态,电池组 2 进入充电状态,依此不断循环,从而实现功率平抑。由图 8 也可看出,2 个电池组在相同时间内吸收/释放了相近的能量,而目标功率是时间 T_d 内预测功率的平均值,因此每个电池组的循环周期 ΔT 为:

$$\Delta T = 2rT_d \quad r = 1, 2, \dots \quad (14)$$

其中, r 表征了电池达到满充或满放时的时间长短。

根据式(3)及图 8 可知,与传统的方法不同,计算本文所提拓扑结构下双电池的容量不仅要考虑待平抑的功率大小,还需考虑循环周期的持续时间。该拓扑结构下双电池容量的计算式为:

$$E_{ES,SY}^{\max} = \max_T \left\{ E_{bi}(t) = \int_{\Delta T_i} P_b(\tau) d\tau, i=1, 2, \dots, T/\Delta T \right\} \quad (15)$$

其中, $E_{ES,SY}^{\max}$ 为 2 个电池组的总容量。由式(15)及图 6 可知,该结构下的电池需要更大的容量来保证长时间持续的充放电。

传统结构下的电池在 T_d 内需经历多个循环,而双元互补结构下的电池经历 1 个循环的时间可能是 T_d 的几倍。考虑到电池的充放电循环次数相对固定,因此双元互补结构下的电池具有更长的使用寿命。根据式(9)~(12),容量和使用寿命都影响着储能系统的成本。从上述分析可知,2 种储能结构各有优势,因此在进行储能配置时需要在更长的使用寿命与更大的储能容量中进行选择。为了更直观地进行对比,将 2 种结构下的电池参数转化为经济指标。将每次的放电事件折算为有效安培小时数^[22],其表达式为:

$$d_{\text{eff}} = \left(\frac{D_{\text{DoD}}}{D_R} \right)^{u_0} e^{u_1(D_{\text{DoD}}/D_R - 1)} \frac{C_R}{C_A} d_{\text{act}} \quad (16)$$

$$L_f = \frac{L_R D_R C_R}{\sum_{\xi=1}^n d_{\text{eff}}(\xi)} T \quad (17)$$

其中, d_{act} 为实际电流下的安培小时数; u_0, u_1 为特性参数,可通过厂商提供的手册获得; C_A 为实际的放电容量,同样可通过查询出厂手册获得; D_{DoD} 为实际放电深度; D_R 为额定放电深度; C_R 为额定放电容量; L_R 为额定条件下的电池充放电循环次数; $d_{\text{eff}}(\xi)$ 为有效安培小时数; n 为运行周期内发生的充放电循环次数。因此 2 种结构下的电池在运行时间 T 内需更换的次数为:

$$K = T/L_f \quad (18)$$

将式(16)~(18)代入式(12),可得运行时间 T 内的更换费用 C_{RE} ,将式(15)代入式(10),可得引入双元互补结构后的储能投资成本 C_{IN} ,从而便于进行 2 种储能结构的经济性对比。

3 储能系统经济配置

根据第 1、2 节的内容,以接入储能后系统的总收益 B_{benefit} 为目标函数,其表达式为:

$$B_{\text{benefit}} = (E_{\text{SW}} + E_{\text{XN}})p - (C_{\text{IN}} + C_{\text{RE}} + C_{\text{OM}}) \quad (19)$$

上述模型需满足的约束条件为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ES} \leq P_{ES, XZ}^{\max} \\ 0 \leq E_{ES} \leq E_{ES, XZ}^{\max} \end{cases} \quad (20)$$

本文采用枚举法列举所有可能接入的储能容量及充放电功率,分别计算2种结构下每一种电池储能接入系统的收益,以系统最大收益为目标,确定接入电池储能系统的容量及充放电功率,具体步骤如下:

- 根据储能系统的最大充放电功率及最大容量,以0.01 MW为步长,枚举系统可能接入的所有储能容量和充放电功率;
- 逐一计算双元互补结构下的容量及使用寿命,得到2种不同结构下储能系统的配置方案;
- 根据步骤b所得方案,计算对应的系统总收益;
- 以系统总收益最大为目标,确定接入储能系统的最优容量及功率。

4 算例分析

本文以西班牙某装机容量为40 MW的光伏电站为例进行分析,算例所用数据为该光伏电站1 a的输出功率,运行周期为1 a,其余相关参数见附录中的表A1^[23]。算例考虑了不同的预测精度和不同的储能结构对储能配置成本的影响。

4.1 不同预测精度对配置储能的影响

调度机构根据预测功率制定光伏电站相应时段的调度功率,然而不同预测算法的精度不尽相同。为了探究预测精度对储能配置的影响,选取该光伏电站典型日A、B、C的出力曲线,并假定预测误差为10%,求取相应的储能容量及功率,重复多次实验取平均值,并与无误差的情况进行比较,结果如表1所示。从表1可知,典型日A在考虑了10%预测误差的情况下,所需要配置的储能功率增加了1.2 MW,容量增加了1.13 MW·h;而典型日B的储能功率增加了2.08 MW,容量需求从13.89 MW·h提高到了14.64 MW·h;典型日C的功率提高最大,增长了2.5 MW,相应的容量增加了1.51 MW·h。从以上数据可以分析得到,预测算法误差的存在将导致光伏电站需要配置更高容量和更大功率的储能系统。为了进一步分析预测精度对储能配置的影响,将典型日A置于不同的预测精度下,其储能配置与预测误差的关系见附录中的图A1。从图A1可以看出,储能功

表1 不同预测误差下的储能配置结果对比

Table 1 Comparison of energy storage configuration results under different prediction errors

典型日	功率/MW		容量/(MW·h)	
	无误差	10%预测误差	无误差	10%预测误差
A	12.90	14.10	16.83	17.96
B	10.80	12.88	13.89	14.61
C	15.62	18.12	14.33	15.84

率和容量的增长速度不尽相同,但总体趋势一致,都随着预测误差的增大而不断增加。因此,预测误差越大,光伏电站对储能的要求也越高,相应的投资成本也将增加。

4.2 不同储能拓扑结构对电池特性及其成本的影响

第2节比较了2种储能拓扑结构下电池的特性,双元互补结构下的电池具有更长的使用寿命,然而其容量也比传统结构下的电池容量更大。本节将从投资成本的角度对两者的特性进行分析。提取光伏电站春、夏、秋、冬4个典型日的功率波动曲线,计算传统结构下电池全年日平均充放电循环次数为45次,由式(14)可知双元互补结构下电池的循环周期为 T_d 的 $2r$ 倍,根据不同的 r ,其使用寿命及容量也不同。选取不同的 r 值,并计算2种结构下储能电池的成本,结果如表2所示。

表2 2种结构下的电池成本对比

Table 2 Comparison of battery costs under two structures

储能结构	电池容量/(MW·h)	电池使用寿命/a	电池成本/万元
双元互补结构	$r=1$	17.40	5.9
	$r=2$	21.18	8.8
	$r=3$	28.43	14.2
传统结构	14.34	2.1	2.643×10 ⁷

由表2可知,随着 r 取值增大,双元互补结构下电池的使用寿命和容量都增大,其使用寿命是传统结构下电池使用寿命的数倍;然而从电池成本来看,双元互补结构下电池的成本远远高于传统结构下电池的成本,究其原因可能是因为算例运行时间过短。本文算例的运行时间设置为1 a,导致双元互补结构下电池的使用寿命长的优势无法在电池成本中体现,而高容量则直接反映在 C_{IN} 中。因此,取 $r=2$,设置不同的时间尺度,进一步比较2种结构下储能电池的成本,结果如表3所示。

表3 不同时间尺度下的电池成本对比

Table 3 Comparison of battery costs under different time scales

T/a	电池成本/万元		T/a	电池成本/万元	
	双元互补结构	传统结构		双元互补结构	传统结构
1	3.332×10 ⁷	2.643×10 ⁷	5	5.122×10 ⁷	7.348×10 ⁷
2	4.013×10 ⁷	3.219×10 ⁷	10	9.418×10 ⁷	9.728×10 ⁷

由表3可知,第1年,传统结构下电池的成本比双元互补结构下电池的成本低 6.89×10^6 万元;第2年,传统结构下电池的成本比双元互补结构下电池的成本低 7.94×10^6 万元,这是因为在第2年2种结构下的储能系统都没有进行电池更换,导致价格差距拉大的主要原因是年运行维修费用不同,且容量越大,其运行维修费用越高;到第5年,双元互补结构体现出其优势,该结构下的电池成本比传统结构节约了 2.226×10^7 万元,这主要得益于电池较长的

使用寿命,此时传统结构下的储能系统已经进行了 2 次电池更换,而双元互补结构下的电池仍处在其寿命周期内;到第 10 年,2 种储能结构下的电池成本接近,这是因为双元互补结构($r=2$)下的储能系统在第 10 年进行了 1 次电池更换,导致储能成本提高,但在随后的 10 a 中,相较于传统结构,双元互补结构将一直具有价格优势。考虑到光伏电站的实际运行周期通常较长,因此从经济角度来看,双元互补拓扑结构更具有应用潜力。

4.3 最优配置与快速配置方法的经济性比较

利用本文所提模型计算得到在预测误差为 10% 的情况下该光伏电站的最优储能配置为 10.85 MW/14.11 MW·h,其平抑效果为 92%。将该方法与 1.1 节所提 2 种快速匹配方法($P_{ES} = P_{ES}^{\max}$ 情况下的快速配置方法(最大功率配置方法)和 $E_{ES} = E_{ES}^{\max}$ 情况下的快速配置方法(最大容量配置方法))进行比较。将平抑效果 92% 作为条件,从而分别确定 $P_{ES} = P_{ES}^{\max}$ 与 $E_{ES} = E_{ES}^{\max}$ 这 2 种情况下的储能配置,由于平抑效果相同,收益结果差距不大,因此仅对电池成本进行比较,比较结果如表 4 所示。

表 4 最优配置与快速配置方法的成本比较

Table 4 Cost comparison between optimal allocation and rapid configuration methods

方法	电池容量/ (MW·h)	电池功率/ MW	电池成本/ 万元
最优配置	14.11	10.85	2.344×10^7
最大功率配置	12.97	18.77	2.828×10^7
最大容量配置	18.78	12.13	3.216×10^7

由表 4 可知,最大功率快速配置方法的电池成本比最优配置方法高 4.84×10^6 万元,最大容量快速配置方法的电池成本比最优配置方法高 8.72×10^6 万元,3 种方法的计算结果相近。因此通过快速配置方法虽然无法得到最优储能配置方案,但却可以作为一种快速的估计方法,为后续规划提供参考。

5 结论

本文分析了预测算法误差对储能定容的影响,并引入一种双元互补的储能拓扑结构,通过算例进一步分析了储能结构与电池寿命、容量与储能成本之间的关系。由仿真结果可得如下结论:

a. 预测算法精度对储能系统的配置有影响,算法误差将导致储能容量和功率增加,同时误差越大,所配置储能的功率和容量越大;

b. 相较于传统的单电池结构,本文引入的双元互补结构可以有效地提高电池的使用寿命,但是代价是增大了电池的容量,从而在电站运行初期造成成本增加,但这一情况会随着光伏电站运行时间的增长而逐渐消失,并且在一定的运行年限后,相较于传统结构,该结构的经济优势将逐渐体现,并持续

保持;

c. 本文提出了一种储能快速配置方法,虽然无法直接得到最优储能配置方案,但通过该方法得到的估计结果与最优方案的差距不大,可以为前期规划提供参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王秀丽,武泽辰,曲翀. 光伏发电系统可靠性分析及其置信容量计算[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):15-21.
WANG Xiuli, WU Zechen, QU Chong. Reliability and capacity value evaluation of photovoltaic generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 15-21.
- [2] 周任军,黄灵资,王靓,等. 基于风险和条件风险方法的光伏电站并网极限容量计算[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):1-5.
ZHOU Renjun, HUANG Lingzi, WANG Liang, et al. Capacity limit calculation based on risk and conditional risk method for grid-connected photovoltaic power station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 1-5.
- [3] 杨清,袁越,王敏,等. 独立型水光储微电网系统容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):37-44.
YANG Qing, YUAN Yue, WANG Min, et al. Optimal capacity configuration of standalone hydro-photovoltaic-storage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 37-44.
- [4] LI Xiangjun, HUI Dong, LAI Xiaokang. Battery Energy Storage Station (BESS)-based smoothing control of PhotoVoltaic (PV) and wind power generation fluctuations[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 464-473.
- [5] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [6] CHENG Feng, WILLARD S, HAWKINS J, et al. Applying battery energy storage to enhance the benefits of photovoltaics[C]//2012 IEEE Energytech. Cleveland, OH, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [7] 王成山,于波,肖峻,等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):1-8.
WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.
- [8] 张野,郭力,贾宏杰,等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(16):36-41.
ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hongjie, et al. An energy management method of hybrid energy storage system based on smoothing control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 36-41.
- [9] 丁明,吴建锋,朱承治,等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):22-29.
DING Ming, WU Jianfeng, ZHU Chengzhi, et al. A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 22-29.
- [10] ESMAILI A, NOVAKOVIC B, NASIRI A, et al. A hybrid system of Li-ion capacitors and flow battery for dynamic wind energy support[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1649-1657.
- [11] 张新松,顾菊平,袁越,等. 基于电池储能系统的风功率波动平

- 抑策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4752-4760.
ZHANG Xinsong, GU Juping, YUAN Yue, et al. Strategy of smoothing wind power fluctuation based on battery energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4752-4760.
- [12] CHEN S X, GOOI H B, WANG M Q. Sizing of energy storage for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 142-151.
- [13] 田培根, 肖曦, 丁若星, 等. 自治型微电网多元复合储能系统容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 168-173.
TIAN Peigen, XIAO Xi, DING Ruoxing, et al. A capacity configuring method of composite energy storage system in autonomous multi-microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 168-173.
- [14] 何俊, 邓长虹, 徐秋实, 等. 基于等可信容量的风光储电源优化配置方法[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3317-3324.
HE Jun, DENG Changhong, XU Qiushi, et al. Optimal configuration of distributed generation system containing wind PV battery power sources based on equivalent credible capacity theory [J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3317-3324.
- [15] 谭兴国, 王辉, 张黎, 等. 微电网复合储能多目标优化配置方法及评价指标[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 7-14.
TAN Xingguo, WANG Hui, ZHANG Li, et al. Multi-objective optimization of hybrid energy storage and assessment indices in microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 7-14.
- [16] LEE T Y, CHEN N M. Optimal capacity of the battery energy storage system in a power system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(4): 667-673.
- [17] JENKINS D P, FLETCHER J, KANE D. Lifetime prediction and sizing of lead-acid batteries for microgeneration storage applications [J]. IET Renewable Power Generation, 2008, 2(3): 191-200.
- [18] 丁明, 徐宁舟. 基于马尔可夫链的光伏发电系统输出功率短期预测方法[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 152-157.
DING Ming, XU Ningzhou. A method to forecast short-term output power of photovoltaic generation system based on Markov chain[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 152-157.
- [19] ZIADI Z, OSHIRO M, SENJYU T, et al. Optimal voltage control using inverters interfaced with PV systems considering forecast error in a distribution system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 682-690.
- [20] 林少伯, 韩民晓, 赵国鹏, 等. 基于随机预测误差的分布式光伏配网储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 25-33.
LIN Shaobo, HAN Minxiao, ZHAO Guopeng, et al. Capacity allocation of energy storage in distributed photovoltaic power system based on stochastic prediction error[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 25-33.
- [21] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于模糊识别的光伏发电短期预测系统[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 83-89.
CHEN Changsong, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Short-term photovoltaic generation forecasting system based on fuzzy recognition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 83-89.
- [22] BAHRAMIRAD S, REDER W, KHODAEI A. Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2056-2062.
- [23] European Commission Joint Research Centre. PVGIS [EB/OL]. [2018-04-03]. http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html.

作者简介:



张江林

张江林(1976—),男,四川成都人,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定和控制、新能源接入、物联网技术(E-mail: zhangjianglin@cuit.edu.cn);

高红均(1989—),男,重庆人,副研究员,博士,主要研究方向为电力系统不确定性优化及其相关应用(E-mail: gaohongjun@scu.edu.cn);

王家怡(1994—),女,河北石家庄人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为配电网优化规划与运行(E-mail: 994342168@qq.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力市场、电力系统稳定与控制、分布式发电及智能电网(E-mail: junyong@scu.edu.cn)。

Economic allocation of energy storage in photovoltaic power station considering prediction accuracy and topological structure

ZHANG Jianglin^{1,2}, GAO Hongjun¹, WANG Jiayi¹, HONG Juhua¹, LIU Junyong¹, ZHUANG Huimin²

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Control Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Energy storage system can well support PV (PhotoVoltaic) power station connecting to power grid. In order to improve the configuration accuracy of energy storage and reduce the cost of energy storage system, considering the shortcomings of existing research, the influences of the error of PV power station output power prediction algorithm and the topological structure of energy storage on energy storage configuration are analyzed. A fast energy storage configuration method is proposed. The influence of prediction algorithm's error on the capacity determination of energy storage is analyzed and the revenue model of energy storage is improved. A topological structure of energy storage system with dual complementary units is introduced, and its influences on the battery characteristics and the cost model of energy storage are analyzed. The investment income model is established with the maximum economic benefit as its objective. The optimal energy storage configuration scheme of a PV power station is determined based on the actual data. The example results show that, the error of prediction algorithm will lead to the increase of energy storage capacity and power, which will lead to the increase of energy storage system cost. The proposed topological structure of energy storage can effectively improve the life of battery and reduce the cost of the energy storage system.

Key words: photovoltaic power station; energy storage system; topological structure; prediction accuracy; costs; capacity configuration

附录

表 A1 相关参数
Table A1 Related parameters

参数	取值
单位功率安装价格 M_p	5×10^5 元/MW
单位容量安装价格 M_E	1.3×10^6 元/(MW·h)
额定放电深度 D_R	70%
光伏上网电价 p	0.75 元/(kW·h)
贴现率 D_s	5%

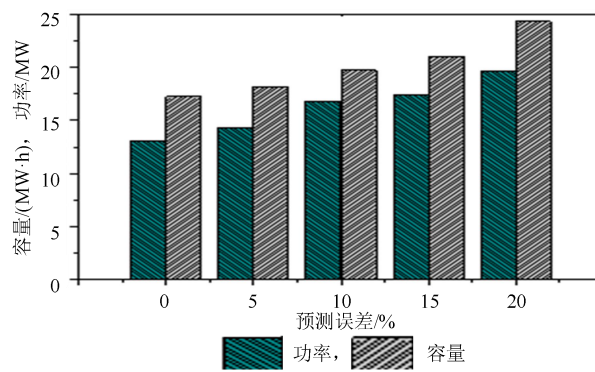


图 A1 储能功率、容量与预测误差的关系

Fig.A1 Relation between prediction error and power and capacity of energy storage