

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.171113

# 风光储系统储能容量优化配置策略

李建林 郭斌琪 牛 萌 修晓青 田立亭

( 新能源与储能运行控制国家重点实验室 ( 中国电力科学研究院 ) 北京 100192 )

**摘要** 储能容量的优化配置是风光储系统的重要问题。针对该问题,提出一种储能优化配置方法。首先建立储能容量配置的双层决策模型,外层规划模型的决策变量为储能的功率和容量配置,目标为储能的初始投资与联络线波动惩罚最低,内层规划模型的决策变量为储能运行过程中的充放电功率,目标为系统联络线功率波动最低;然后基于动态规划方法进行求解;最后对含风电、光伏、电池储能以及负荷的联合发电系统进行算例分析,分别选取春、夏、秋季典型日数据进行仿真,仿真结果表明储能配置策略的有效性。

**关键词:** 风光储 储能配置 动态规划 双层决策

**中图分类号:** TM715

## Optimal Configuration Strategy of Energy Storage Capacity in Wind/PV/Storage Hybrid System

Li Jianlin Guo Binqi Niu Meng Xiu Xiaoqing Tian Liting

( State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems  
China Electric Power Research Institute Beijing 100192 China )

**Abstract** The optimal configuration of Energy storage is an important issue in wind/PV/storage hybrid system designing. This paper proposes a strategy of optimizing energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system. Firstly, the double-layer decision model of the storage capacity configuration is established. The decision variables of the outer decision model are the power and capacity of the energy storage, while the target is the minimum investment of the storage and the contact line penalty. The decision variable of the inner decision model is the charge and discharge power of the energy storage during the operation, while the target is to minimize power fluctuation on system tie line. Then a typical system is analyzed as a simulation example, including wind power, photovoltaic, battery energy storage and load. According to the typical daily data in spring, summer and winter, the simulation results verify the energy storage configuration strategy proposed.

**Keywords :** Wind/PV/storage, energy storage configuration, dynamic programming, double layer decision

## 0 引言

可再生能源具有波动性和间歇性,需要通过储

能技术对其出力波动进行平抑,电池储能具有能量高、安装灵活、充放电速度快的特点,成为优先发展方向之一<sup>[1-3]</sup>。储能容量的优化配置是含储能的可再生能源发电系统设计规划中的重要问题。

关于储能配合可再生能源的容量配置策略,国内外已有很多相关研究。文献[4,5]先通过由并网输出功率的平抑效果来确定最佳的一阶低通滤波器的

国家重点研发计划 ( 2017YFB0903504 ) 和国家电网公司科技项目 : 分布式储能装置及用户侧优化配置关键技术与示范 ( DG71-17-003 ) 资助。

收稿日期 2017-07-28 改稿日期 2017-12-18

时间常数,通过该时间常数来进行储能系统功率和容量的配置。文献[6,7]采用频谱分析的方法对输出功率储能进行优化配置,但上述文献均为平抑新能源波动的单目标优化,并未考虑储能系统寿命以及成本因素等。文献[8-10]通过分析历史运行数据,总结微电网出力波动的分布规律,然后基于平抑效果、成本等目标,求解储能系统所需配置的容量。文献[11,12]分析工业重要负荷的运行特性,结合分时电价机制,以光伏利用率最大和年净利润最大为目标,构建了工业光伏储能系统的储能容量优化配置方法。文献[13,14]考虑到新能源出力的随机性,提出了基于机会约束规划的混合储能容量配置方法,以成本最低为目标,采用遗传算法求解,以上文献虽加入了成本约束,但仍有不足,所提出的方法均能较好解决新能源出力波动,但局限于源侧,并未考虑用户侧负荷波动等。文献[15,16]针对包含光伏发电、风力发电和典型负荷的微电网,提出一种合理配置复合储能容量的方法,以装置成本最低、功率匹配最佳、可再生能源输出功率平滑度最好建立复合储能多目标优化数学模型,采用自适应惯性权重的粒子群算法求解,但同样局限于系统内部,未考虑外送联络线波动惩罚。

本文提出一种基于双层决策模型的风光储联合发电系统储能容量的优化配置方法,可兼顾系统的稳定性和经济性。其中,外层规划模型使储能的初始投资与联络线波动惩罚最低,充分考虑系统的经济性;内层规划模型通过对储能的功率和容量配置约束,使系统联络线功率波动最低,从而使系统稳定性达到最优。然后选取风光储系统不同季节的典型日数据进行算例分析,仿真结果表明该储能配置方法的有效性。

## 1 双层决策问题

双层决策问题是一种具有两层递阶结构的系统优化问题,而且外层优化问题和内层优化问题都有各自的目标函数和约束条件,外层优化问题的目标函数和约束条件不仅与外层优化问题的决策变量相关,而且还依赖于内层优化问题的最优解,而内层优化问题的最优解又受外层优化问题的决策变量影响。双层决策问题的一般数学模型为<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} \min_x F(x, y) & \text{s.t. } g(x, y) = 0 \\ \min_y f(x, y) & \text{s.t. } h(x, y) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $x \in \mathbf{R}^{n_x}$ ,  $y \in \mathbf{R}^{n_y}$  分别为外层优化问题和内层

优化问题的决策变量;  $F, f: \mathbf{R}^{n_x+n_y} \rightarrow \mathbf{R}$  分别为外层优化问题和内层优化问题的目标函数;  $g: \mathbf{R}^{n_x+n_y} \rightarrow \mathbf{R}^{n_g}$ ,  $h: \mathbf{R}^{n_x+n_y} \rightarrow \mathbf{R}^{n_h}$  分别为外层优化问题和内层优化问题的约束条件。

双层优化问题通常难以得到全局最优解,通过数值解法进行迭代逼近,满足一定的收敛条件后,即认为达到了最优。

## 2 储能配置模型

本文提出的双层规划模型如图1所示,外层规划模型的决策变量为储能的功率和容量配置,目标为储能的初始投资与系统联络线波动惩罚最低;内层规划模型的决策变量为储能运行过程中的充放电功率,目标为系统联络线功率波动最低。

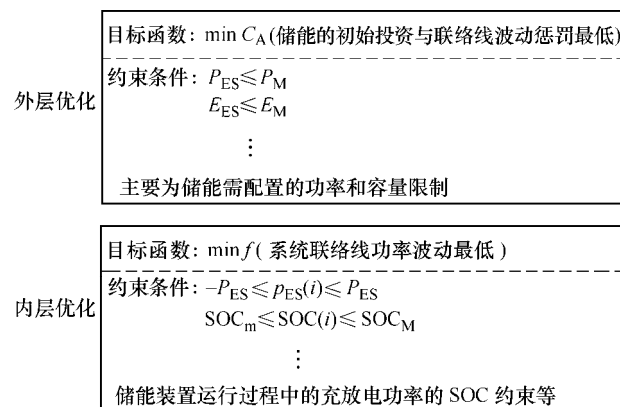


图1 双层规划模型架构

Fig.1 Double-layer decision model architecture

### 2.1 外层模型

目标函数为

$$\min C_A = c_1 P_{ES} + c_2 E_{ES} + \lambda \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [p_{ES}(i) + p_L(i) - p_G(i) - P_{base}]^2} \quad (2)$$

式中,  $P_{ES}$  为风光储能配置功率;  $E_{ES}$  为风光储系统中储能配置容量;  $c_1$  为单位功率费用(元/kW),对于锂电池、铅酸等电池储能,主要为功率变流器(PCS)的单位购置费用;  $c_2$  为单位容量费用(元/(kW·h)),主要为电池的单位容量购置费用;  $\lambda$  为联络线功率波动引起的惩罚系数(元/kW);  $p_{ES}(i)$ 、 $p_L(i)$ 、 $p_G(i)$  分别为第  $i$  时段中,系统内的储能功率、负荷功率和发电功率;  $P_{base}$  为系统上报的基准容量。目标函数的前两项之和代表了储能的购置成本,后一项代表了电网因系统的功率偏移而增加的备用容量成本。

约束条件为

$$\begin{cases} P_{ES} & P_M \\ E_{ES} & E_M \\ P_{ES} & p_{ES}(i) \\ E_{ES} & \frac{1}{SOC_M - SOC_0} \sum_{k=1}^i \alpha(i) p_{ES}(i) \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $i$  为计算时段 ( $i=1,2,\dots,N$ );  $P_M$ 、 $E_M$  分别为由于安装场地、并网功率等限制条件下允许的储能最大功率和容量;  $SOC_M$  为电池储能系统允许的最高荷电状态,  $SOC_0$  为电池储能系统每日的初始荷电状态。将储能的充放电功率  $p_{ES}(i)$  定义为充电时  $p_{ES}(i) > 0$ 、放电时  $p_{ES}(i) < 0$ , 假设储能系统的充电效率  $\eta_c$  和放电效率  $\eta_d$  在运行过程中保持不变, 令

$$\alpha(i) = \begin{cases} \eta_c & p_{ES}(i) > 0 \\ \frac{1}{\eta_d} & p_{ES}(i) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

## 2.2 内层模型

目标函数为

$$\begin{cases} \min f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p_{ES}(i) + p_L(i) - p_G(i) - \bar{P}]^2 \\ \bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p_{ES}(i) + p_L(i) - p_G(i)] \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $f$  为一日内联络线功率的波动方差;  $\bar{P}$  为系统联络线功率均值。

约束条件为

$$\begin{cases} -P_{ES} & p_{ES}(i) & P_{ES} \\ SOC_m & SOC(i) & SOC_M \\ -P_{G0} & p_{ES}(i) + p_L(i) - p_G(i) & P_{L0} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $P_{L0}$ 、 $P_{G0}$  分别为用户被允许的最大用电功率及反送功率。

结合式 (4), 可得

$$SOC(i) = SOC(i-1) + \frac{\alpha(i) p_{ES}(i) \Delta t}{E_{ES}} \quad (7)$$

式中,  $\Delta t$  为计算时段长度 (min)。

## 2.3 求解方法

以上分析可以看出, 外层规划模型为二次规划问题, 容易求解; 内层规划为混合整数非线性规划 (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP) 问题, 但其目标函数可表述为一元函数和的形式, 此

时可用动态规划方法进行求解。动态规划方法通过阶段划分把一个多变量的优化问题分解为多个单变量优化问题, 是求解该类问题的有效算法。动态规划模型需要确定计算的决策量和状态量。对于各可控资源, 每个计算时段的功率是动态规划模型中的决策量; 对于储能, 每个计算时段末的 SOC 是其状态量, 初始状态量和结束状态量均为已知量。

动态规划决策过程的最优策略具有这样的性质: 不论初始状态和初始决策如何, 当把其中的任何一级和状态再作为初始级和初始状态时, 其余的决策对此必定也是一个最优策略。即若有一个初始状态为  $x(0)$  的  $N$  级决策过程, 其最优策略为  $\{u(1), u(2), \dots, u(N-1)\}$ 。那么, 对于以  $x(1)$  为初始状态的  $N-1$  级决策过程来说, 决策集合  $\{u(1), u(2), \dots, u(N-1)\}$  必定是最优策略。

图 2 为  $N$  级决策阶段状态转移示意图。一个  $N$  级决策过程的动态方程可描述为

$$\begin{cases} x(k+1) = f[x(k), u(k), k] \\ x(0) = x_0 \end{cases} \quad (8)$$

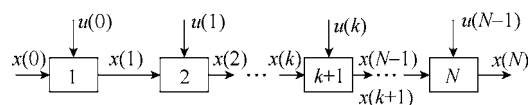


图 2 阶段状态转移示意图

Fig.2 Transition diagram of stage state

式 (8) 的状态约束为  $x(k) \in X \in \mathbf{R}^n$ ; 控制 (决策) 约束为  $u(k) \in \Omega \subset \mathbf{R}^m$ ; 此时, 规划问题可描述为求解一个最优控制 (决策) 系列  $u^*(k)$ ,  $k=0,1,\dots,N-1$ , 使得性能指标最小, 性能指标可描述为

$$J_N[x(0)] = \phi[x(N), N] + \sum_{k=0}^{N-1} L[x(k), u(k), k] \quad (9)$$

动态规划问题的求解可分为前向和后向两种方法。所谓前向是指从起点出发, 层层递推直到终点; 后向即从终点倒推, 逆向求解。在实际问题中, 后向动态规划更为常用。

后向动态规划算法从周期  $N-1$  开始, 按时间反向递推到周期 0, 可表示为

$$\begin{aligned} J_{N-k}^*[x(k)] &= \min_{u \in \Omega} J[x(k)] \\ &= \min_{u \in \Omega} \left\{ \phi[x(N), N] + \sum_{j=k}^{N-1} L[x(j), u(j), j] \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

动态方程为

$$\begin{cases} x(k+1) = f[x(k), u(k), k] \\ x(k) \in X \subset \mathbf{R}^n \\ u(k) \in \Omega \subset \mathbf{R}^m \end{cases} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

式(11)可表示为

$$J_{N-k}^*[x(k)] = \min_{u(k) \in \Omega} \{L[x(k), u(k), k] + J_{N-k-1}^*[x(k+1)]\} \\ k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (12)$$

求解步骤如下:

(1) 求第  $N$  级最优控制

$$J_1^*[x(N-1)] = \min_{u(N-1) \in \Omega} \{L[x(N-1), u(N-1), N-1] + J_0^*[x(N)]\} \quad (13)$$

解得

$$u^*(N-1) = u^*[x(N-1)], J_1^*[x(N-1)] \quad (14)$$

(2) 求得  $N-1$  级最优控制

$$J_2^*[x(N-2)] = \min_{u(N-2) \in \Omega} \{L[x(N-2), u(N-2), N-2] + J_1^*[x(N-1)]\} \quad (15)$$

解得

$$u^*(N-2) = u^*[x(N-2)], J_2^*[x(N-2)] \quad (16)$$

(3) 依次类推, 求得第  $k+1$  级的最优控制

$$J_{N-k}^*[x(k)] = \min_{u(k) \in \Omega} \{L[x(k), u(k), k] + J_{N-k-1}^*[x(k+1)]\} \quad (17)$$

解得

$$u^*(k) = u^*[x(k)], J_{N-k}^*[x(k)] \quad (18)$$

(4) 求得第 1 级的最优控制

$$J_N^*[x(0)] = \min_{u(1) \in \Omega} \{L[x(0), u(0), 0] + J_{N-2}^*[x(1)]\} \quad (19)$$

解得

$$u^*(0) = u^*[x(0)], J_N^*[x(0)] \quad (20)$$

(5) 由初态  $x(0)$  和约束函数, 顺序求出各级控制策略、状态以及代价。

将储能在每个阶段结束时的 SOC 作为该级状态, 假设在各阶段, 储能系统在该阶段的充放电功率  $p_{ES}(i)$  为决策量, 风/光的损失则成为相应代价函数, 而式(7)即为动态方程。

由储能充放电功率限制, 以及联络线功率限制,

建立储能充放电功率的决策集。依据储能运行的 SOC 范围, 建立储能的状态集。按照上述求解步骤进行储能最优充放电过程的求解, 图 3 为 SOC 阶段状态转移示意图。

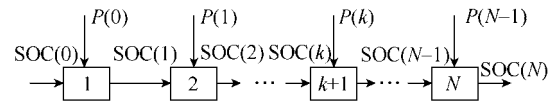


图 3 SOC 阶段状态转移示意图

Fig.3 State transition diagram of SOC in each phase

图 4 为基于双层决策的风光储系统储能配置流程。由于采用双层规划模型求解较难得到全局最优解, 因此, 采用数值计算方法, 利用固定次数的步骤直接迭代, 当满足一定的收敛条件, 即认为最优。图中,  $E_{ES}^s$ 、 $P_{ES}^s$  分别表示不同季节  $s$  储能系统的容量和功率配置。

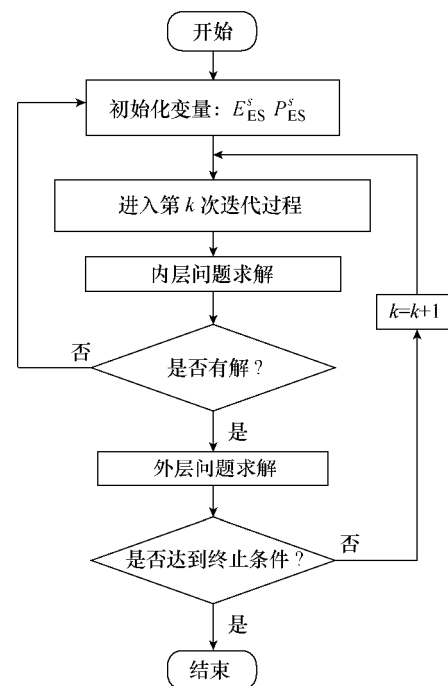


图 4 基于双层决策的储能配置流程

Fig.4 Storage configuration process based on double-layer decision model

### 3 算例分析

算例考察对象为一个含风电、光伏、电池储能以及负荷的风光储系统, 系统结构如图 5 所示。

所考察系统光伏装机容量为 500kW, 风电装机容量为 1 000kW, 最大负荷为 2 400kW, 联络线最大功率限制为 1 600kW, 反送电功率限制为 500kW。

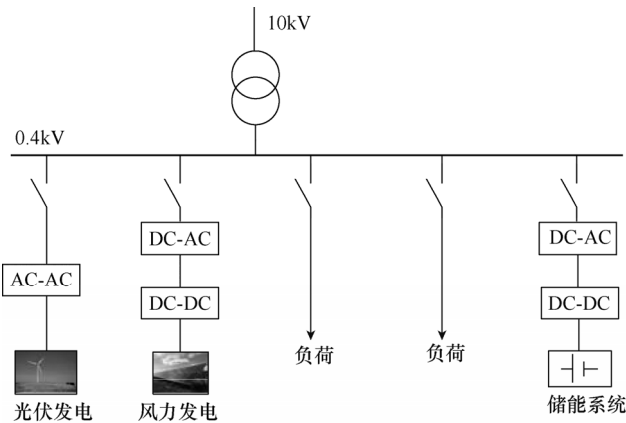


图 5 风光储系统结构

Fig.5 Structure diagram of wind/PV/storage hybrid system

此处，按季节选取风电、光伏典型日出力曲线和典型日负荷曲线，表 1 列出了风光储系统各季节场景指标。由表 1 可以看出，夏季光照强度充足，但风速较低；冬季风资源丰富，但光照强度低，且负荷需求最高；春、秋季节光照、风速相对居中。由于春季和秋季的风电、光伏、负荷曲线比较接近，此处略去秋季。图 6 为未加储能系统时，春、夏、冬季的系统联络线功率曲线，可以看出：三个季节

表 1 风光储系统各季节场景指标

Tab.1 The wind/PV/storage hybrid system parameters in different seasons

项目	指标	春季	夏季	冬季
负荷	最大值/kW	1 884.4	2 170.1	2 378.5
	峰谷差/kW	965.5	940.2	708.8
光伏	最大出力值/kW	391.9	497.2	273.8
	峰谷差/kW	386.8	492.2	270.0
风电	最大出力值/kW	633.8	734.9	968.8
	峰谷差/kW	467.9	570.5	534.4

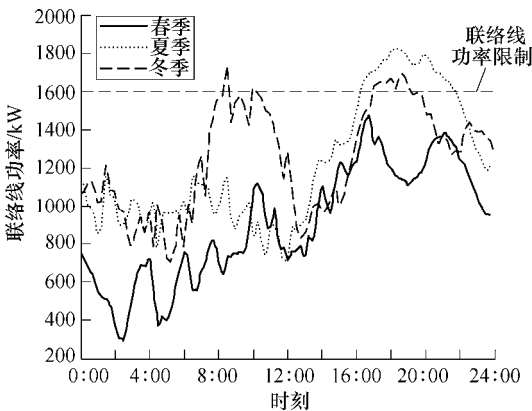


图 6 不同季节联络线功率曲线对比

Fig.6 Contact line power comparison in different seasons

的联络线功率波动均较大，且夏、冬季出现超出联络线功率限制的情况。

表 2 给出仿真算例中仿真参数的取值，根据图 3 所示的基于双层决策的储能配置流程图分别计算不同季节储能系统所需功率容量。不同季节储能功率和联络线功率曲线如图 7 ~ 图 9 所示。

表 2 算例参数

Tab.2 Simulation parameters

参 数	数 值
$c_1$ /(元/kW)	500
$c_2$ /(元/(kW·h))	2 000
$\lambda$ /(元/kW)	15 000
$SOC_m$	0.2
$SOC_M$	1.0
$SOC(0)$	0.5
$P_{L0}$ /kW	1 600
$P_{G0}$ /kW	-500

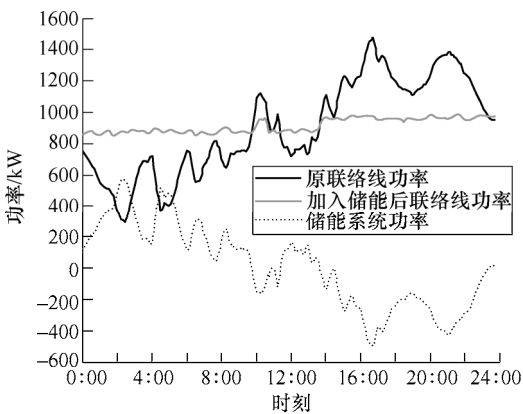


图 7 春季联络线功率和储能功率曲线

Fig.7 The contact line power and storage power in spring

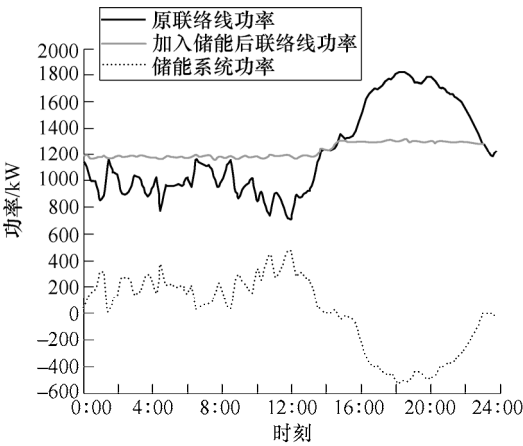


图 8 夏季联络线功率和储能功率曲线

Fig.8 The contact line power and storage power in summer

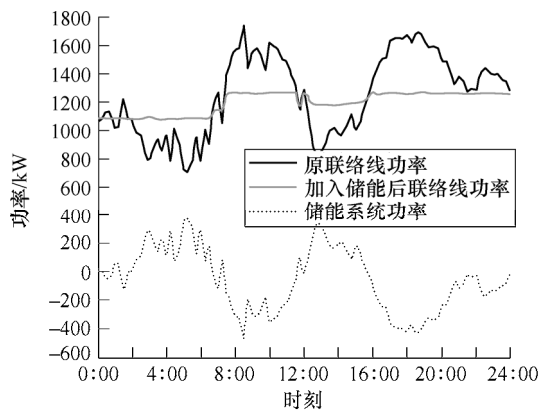


图 9 冬季联络线功率和储能功率曲线

Fig.9 The contact line power and storage power in winter

表 3 加入储能前后各季节联络线功率对比

Tab.3 Comparison of the contact line power in different seasons with and without storage

联络线功率	指标	春季	夏季	冬季
原联络线功率	最大值/kW	1 473.1	1 824.2	1 736.8
	波动值/kW	1 183.0	1 114.7	1 031.0
	方差/ $[(kW)^2]$	98 829.0	88 746.0	78 185.0
加入储能后联络线功率	最大值/kW	985.6	1 319.7	1 267.4
	波动值/kW	132.0	163.6	191.6
	方差/ $[(kW)^2]$	1 992.6	2 782.4	6 202.4

结合图 7~图 9 和表 3,可以看出,加入储能后,各季节系统联络线功率均未超过联络线功率限制 1 600kW,波动范围小于 200kW,波动抑制明显。

表 4 给出了各季节储能优化配置结果。其中,冬季由于风电出力较大,使得其配置储能功率容量最小,为 473kW/957.6kW·h;夏季日间虽然有较大的光伏出力,但夜间负荷高峰使得所需储能容量较大,为 523kW/1 213.4kW·h。

表 4 各季节储能配置结果

Tab.4 Optimal configuration results for storage in different seasons

季节	电池储能功率/kW	电池储能容量/(kW·h)	电池储能系统购置成本/万元	电网备用成本/万元
春季	573.6	1 102.5	251.6	52.6
夏季	523.7	1 213.4	271.7	61.9
冬季	473.1	957.6	146.7	67.5

其次,储能配置功率容量较大,使得联络线功率波动降低,电网备用成本相应降低,但储能购置成本增加;相反,储能配置功率容量较小,储能购置成本减少,但不能较好地抑制联络线功率波动,

电网备用成本相应增加。储能的初始投资和联络线波动最低,二者相互制约。

#### 4 结论

本文提出了一种并网型风光储系统储能优化配置策略,仿真结果表明:

1)基于双层决策的储能容量配置策略有效抑制了联络线功率波动,最大波动值和波动方差远小于原联络线功率波动,有效避免联络线功率指标惩罚。

2)从不同季节储能的配置容量看出,夏季日间虽有较大光伏出力,但夜间负荷高峰使得所需储能容量较大;而冬季较大的风电出力,较低的用电负荷降低了储能配置容量,增加储能后节省电网的备用成本超过 50 万元。

3)内外两层模型的目标函数相互制约,由于很难同时达到最优,因此根据具体应用场景,权衡系统的稳定性和经济性,求解使系统性能可以最大程度发挥的容量配置,仿真结果显示,配置储能后即保证了电网备用成本的降低,又免于联络线惩罚。

本文综合考虑储能投资成本、充放电功率、SOC 以及联络线功率等因素,采用双层决策模型,内层模型考虑系统稳定性,外层模型保证系统经济性,权衡内外两层模型,提出同时保障系统稳定性和经济性的配置方案,为风光储系统中储能优化配置提供可行性思路。

#### 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] 熊雄,杨仁刚,叶林,等. 电力需求侧大规模储能系统经济性评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 224-230.  
Xiong Xiong, Yang Rengang, Ye Lin, et al. Economic evaluation of large-scale energy storage allocation in power demand side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 224-230.
- [3] 雷鸣宇,杨子龙,王一波,等. 光/储混合系统中的

- 储能控制技术研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 86-92.
- Lei Mingyu, Yang Zilong, Wang Yibo, et al. Study on control technology of energy storage station in photovoltaic/storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 86-92.
- [4] Asao T, Takahashi R, Murata T, et al. Evaluation method of power rating and energy capacity of superconducting magnetic energy storage system for output smoothing control of wind farm[C]//18th International Conference on Electrical Machines, IEEE, Vilamoura, Portugal, 2008: 1-6.
- [5] Liang L, Li J, Dong H. An optimal energy storage capacity calculation method for 100MW wind farm[C]//International Conference on Power System Technology, Hangzhou, 2010: 1-4.
- [6] 周念成, 闫立伟, 王强钢. 光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 119-127.
- Zhou Niancheng, Yan Liwei, Wang Qianggang. Research on dynamic characteristic and integration of photovoltaic generation in microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 119-127.
- [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] 曾旭, 席林. 微电网储能系统优化配置研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(14): 52-55, 91.
- Zeng Xu, Xi Lin. Research on capacity configuration of energy storage system for PCC of micro-grid power output smoothness[J]. Low Voltage Apparatus, 2016(14): 52-55, 91.
- [9] Ogimi K, Yoza A, Yona A, et al. A study on optimum capacity of battery energy storage system for wind farm operation with wind power forecast data[C]//IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power, Hong Kong, 2012: 118-123.
- [10] Kargarian A, Hug G. Optimal sizing of energy storage systems: a combination of hourly and intra-hour time perspectives[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 594-600.
- [11] 许健, 刘念, 于雷, 等. 计及重要负荷的工业光伏微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 29-37.
- Xu Jian, Liu Nian, Yu Lei, et al. Optimal allocation of energy storage system of PV microgrid for industries considering important load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 29-37.
- [12] 茆美琴, 金鹏, 张榴晨, 等. 工业用光伏微网运行策略优化与经济性分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 35-45.
- Mao Meiqin, Jin Peng, Zhang Liuchen, et al. Optimization of operation strategies and economic analysis of PV microgrids for industries[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 35-45.
- [13] 谢石晓, 杨莉, 李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 79-84.
- Xie Shixiao, Yang Li, Li Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 79-84.
- [14] 曹超, 马玉鑫, 常悦, 等. 基于经验模态分解和模糊机会约束的混合储能容量配置方法[J]. 分布式能源, 2016, 1(3): 43-48.
- Cao Chao, Ma Yuxin, Chang Yue, et al. Capacity allocation method of hybrid decomposition and fuzzy energy storage system based on empirical mode chance constrained programming[J]. Distributed Energy, 2016, 1(3): 43-48.
- [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] 田培根, 肖曦, 丁若星, 等. 自治型微电网群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.

- [17] 郑乐, 胡伟, 陆秋瑜, 等. 储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2533-2543.

Zheng Le, Hu Wei, Lu Qiuyu, et al. Research on planning and operation model for energy storage

system to optimize wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2533-2543.

---

#### 作者简介

李建林 男, 1976 年生, 博士, 教授级高工, 研究方向为可再生能源并网, 规模化储能电站系统集成以及储能电站实证评估等。

E-mail: dkyjl@163.com (通信作者)

郭斌琪 男, 1994 年生, 硕士研究生, 研究方向为大规模储能集成与控制技术。

E-mail: 1098347046@qq.com

(编辑 郭丽军)