

面向新能源大规模消纳的大容量储能多分区两阶段优化配置方法研究

袁伟*, 王彩霞, 李琼慧, 时智勇

(国网能源研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209)

Multi-area Two-stage Optimal Allocation Method of Large-scale Energy Storage for Renewable Energy Consumption

YUAN Wei*, WANG Caixia, LI Qionghui, SHI Zhiyong

(State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China)

Abstract: At present, there are few studies on the multi-area optimal allocation method for large-scale energy storage for renewable energy consumption. More attention is paid to the optimal allocation of energy storage on the power side and in the microgrid. It is difficult to realize the rational allocation of energy storage on the grid side. Considering the above problem, this paper proposes a multi-area two-stage optimal allocation method for large-scale energy storage to promote renewable energy consumption. In this method, the installed capacity of renewable energy is constant, and impact factors such as peak regulation, system reserve capacity adequacy, and consumption rate of renewable energy are considered. Based on the time sequence simulation method and the sequential sub-problem method, the optimal allocation capacity for large-scale energy storage in different areas can be established. Moreover, quantitative research on the rational allocation of energy storage under the condition of large-scale renewable energy consumption and grid connection has been conducted. With the typical province power grid as a case, the testing results show that the method in this study is effective.

Keywords: renewable energy; large-scale energy storage; multi-area; optimal allocation

摘 要: 目前国内外对适应新能源大规模并网消纳条件下的大容量储能在多分区的协同优化配置研究较少, 多关注在电源侧和微网中储能的优化配置问题, 储能在电网侧多分区的配置效率不高。为了提高大容量储能在多分区配置的合理性, 提出了一种满足新能源消纳的大容量储能多分区协同两阶段优化配置方法。在系统内新能源装机容量一定的前提

下, 综合考虑电网调峰、系统备用容量充裕性和新能源利用率等因素, 采用时序生产模拟方法和序贯子问题法, 可以确定系统中不同分区储能配置的合理容量, 实现了储能在适应大规模新能源并网消纳条件下容量合理配置的定量研究。以典型省级电网为案例, 测算结果验证了方法的有效性。

关键词: 新能源; 大规模储能; 多分区; 优化配置

0 引言

新能源快速发展给系统灵活调节能力提出了新要求^[1-2]。随着中国新能源发电规模的快速增长以及大范围跨区输电格局的建立, 电网对于缓解调峰压力、提高备用水平、减少电网阻塞以及提升跨区通道输送能力等需求日益凸显。

储能技术作为应对上述问题的重要技术方案, 有着广阔的应用前景^[3-5]。中国近年来也制定出台了一系列涉及储能应用发展的支持性政策和方案^[6-9]。结合大规模新能源并网消纳的需求, 合理优化储能的容量配置, 不仅能够进一步缓解能源浪费, 降低新能源并网给电网调度运行带来的冲击, 还可以优化储能投资, 提高社会的整体效益。

目前国内外在储能容量优化配置方面已经开展了相关研究, 研究方向侧重于微电网、新能源场站等的储能配置问题, 部分文献对储能的配置算法进行了改进和优化, 提升了储能配置模型的求解效率, 但均无法解决电网侧不同区域间的储能协同配置问题。文献[10]提出了光热-抽蓄和电化学储能复合储能系统的容量优化模型, 但没有对储能配置容量在不同分区的布

基金项目: 国家电网公司科技项目(4000-201933192A-0-0-00)。

Science and Technology Foundation of SGCC (4000-201933192A-0-0-00)。

局进行优化。针对微网储能配置问题,已经有部分文献开始研究^[11-14]。文献[11]从提升微电网储能资源合理配置方面,提出了计及主配储能协同的微网风光储容量双层优化配置方法,可以提高微网系统调节能力。文献[12]为了改善微网中配置储能的出力波动性,提出了一种接入配网的储能配置优化方法。文献[13]提出了一种兼顾可靠性与经济性的孤岛型光储微网容量配置方法。部分文献针对风电场出力波动的问题,建立了储能参与平抑风电场功率波动的优化配置模型^[15-17]。文献[18]针对地区光伏装机增长过快导致严重弃光的问题,推导了电网侧储能配置容量与光伏发电利用率的关系,并基于典型日开展案例分析。文献[19]通过精确建模,考虑电源、电网和储能的投资成本,提出了单一电网区域下源网储协调规划模型,但没有考虑新能源利用率目标对储能配置的影响。文献[20]以储能月均最低生命周期成本最小为优化目标,针对混合储能容量配置问题,提出了一种基于改进粒子群算法的储能容量优化配置方法。文献[21]考虑网损、电压偏差和投资成本等建立了储能系统多目标优化配置模型,通过提出改进的鲸鱼算法,解决了优化问题容易陷入局部最优的问题。文献[22]提出了基于双层规划的电网侧储能配置算法,但下层规划问题没有考虑不同区域储能配置的差异性。

如表1所示,目前储能容量规划方法大都是基于典型日的新能源出力与负荷需求特性曲线进行计算,缺乏在大区域环境和大时间尺度下的储能容量配置研究,无法考虑新能源出力在长时间尺度的波动性与随机性,使得最后优化得到的储能容量配比不合理,储能配置效率不高,容易造成大量的弃风弃光。此外,现有研究更多关注在新能源场站内或微网(配网)层面的储能容量配置,对于电网侧储能的优化配置研究较少,已有文献仅可以解决单一电网的储能优化配置问题,无法结合新能源发展利用水平统筹优化不同分区的电网侧储能配置规模。

表1 储能优化配置方法对比

Table 1 Comparison of energy storage allocation methods

建模方法		应用领域
已有方法	多基于典型日建模	多应用于微网和新能源场站的配置,电网侧仅能给出总的储能配置需求
本文方法	基于8760 h序列建模	可以考虑不同分区的储能配置需求和规模

为此,本文提出一种满足新能源消纳的大容量储能多分区协同两阶段优化配置方法。在系统内新能源装机容量一定的前提下,综合考虑电网调峰、系统备用容量充裕性和新能源利用率等因素,采用时序生产模拟方法和序贯子问题法,可以确定系统中不同分区储能配置的合理容量,实现了储能在适应大规模新能源并网消纳条件下容量合理配置方面的定量研究。基于国内典型省级电网开展案例分析,测试结果验证了所提方法的有效性。

1 储能提升新能源消纳机理分析

对于内部无网络约束的系统,新能源消纳空间是由系统负荷和区域外送功率之和与系统调节能力下限之间的系统调节空间决定的。对于不含储能的系统来说,其在 t 时刻可消纳的最大新能源电力 $p_{re}^{max}(t)$ 为

$$p_{re}^{max}(t) = p_d(t) + p_l^{out}(t) - \sum_{i \in I} p_i^{min} \quad (1)$$

式中: $p_d(t)$ 为 t 时刻的系统负荷需求; $p_l^{out}(t)$ 为 t 时刻该区域联络线的外送功率; p_i^{min} 为火电机组 i 的最小发电水平。其中联络线传输功率必须满足联络线安全容量限制约束:

$$p_i^{min} \leq p_l^{out}(t) \leq p_l^{max} \quad (2)$$

式中: p_i^{min} 和 p_l^{max} 分别为联络线输送功率的最小值限制和最大值限制。

通常为了保证系统负荷需求平衡可以在任意时刻满足,在不改变开关机状态时,需要保证系统中常规机组的开机最大出力水平之和要大于系统负荷需求和区域外送功率之和的最大值,并留有一定的正备用容量:

$$\sum_{i \in I} p_i^{max} \geq \max(p_d(t) + p_l^{out}(t)) + r^+ \quad (3)$$

式中: p_i^{max} 为火电机组 i 的最大发电水平; r^+ 为系统的正备用需求。

根据式(1),时刻 t 处开机机组的最小出力之和越小,系统对新能源消纳的空间就越大。然而根据式(3),如果系统中开机运行机组数量过少,可能无法保证满足系统调峰备用需求。这个问题通过引入储能可以解决。当系统引入储能后,式(1)和式(3)可以分别改写为如下式(4)和式(5):

$$p_{re}^{max}(t) = p_d(t) + p_l^{out}(t) - \sum_{i \in I} p_i^{min} + p_{char}^{max} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} p_i^{max} + p_{dischar}^{max} \geq \max(p_d(t) + p_l^{out}(t)) + r^+ \quad (5)$$

式中： $p_{\text{dischar}}^{\max}$ 为储能电池的最大放电功率； $p_{\text{char}}^{\max}$ 为储能电池的最大充电功率。

根据式(4)，引入储能后，通过给储能电池充电，可以增加系统对新能源的消纳空间。根据式(5)，引入储能除了可以增加系统对新能源的消纳空间外，还可以通过储能电池放电，保证满足系统备用需求。因此，系统中新能源出力过大时，通过储能充电可以提高系统对新能源的消纳空间；而系统负荷需求过高、发电资源不够时，通过储能放电可以保证发电容量的充裕性。

2 储能优化配置方法构建思路

考虑储能投资成本、风光出力特性、负荷特性、电网调节能力等，建立大容量储能多分区两阶段优化配置方法。第一阶段通过求解长期优化调度模型，确定区域电网的新能源最大消纳量；第二阶段，结合第一阶段的计算结果，以储能投资成本最低为优化目标，采用二分法更新储能配置规模，并返回第一阶段求解模型。配置方法流程如图1所示，具体步骤如下。

1) 输入电网、电源和负荷数据等。

2) 确定储能初始配置规模及相关参数，包括储能逆变器功率、储能电池容量、逆变器单位容量建造成本、电池单位容量建造成本等。

3) 以新能源消纳量为优化目标，建立以年度为时间周期的优化调度模型。

4) 给定新能源受阻地区集合，对于每个新能源受阻地区依次进行以下步骤。

5) 第一阶段：求解在步骤3)中建立的长期优化调度模型，可得到给定区域电网在当前边界条件下的新能源最大消纳量。

6) 第二阶段开始：更新储能配置规模优化区间。

7) 判断当前储能逆变器功率优化区间的长度是否小于某一非常小的常数，如果是，执行步骤9)；反之，执行步骤8)。

8) 第二阶段结束：采用二分法更新当前新能源受阻地区内储能的逆变器功率，同时其他新能源受阻地区的储能配置规模保持不变，然后执行步骤5)。

9) 如果新能源受阻地区集合中所有元素均已遍历，则执行下一个步骤；反之，执行步骤4)。

10) 根据所有新能源受阻地区储能配置规模，计算得到储能的总投资费用，流程结束。

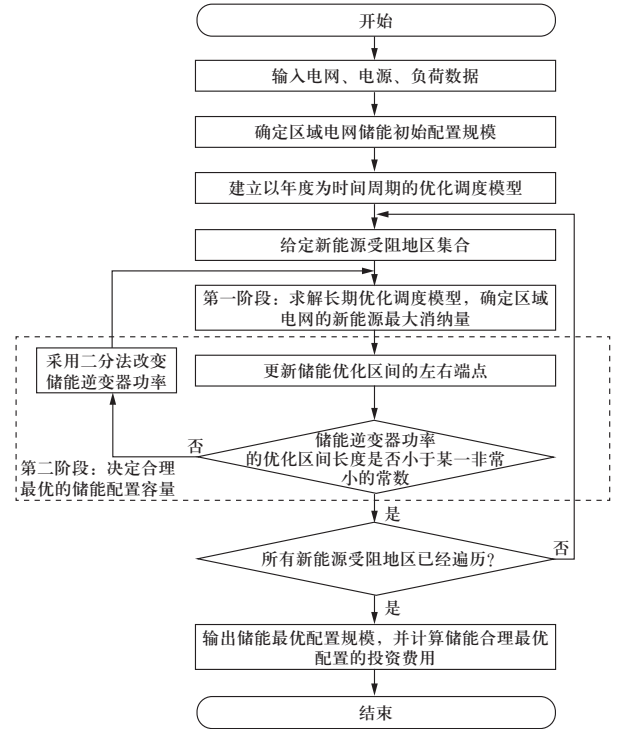


图1 大容量储能多分区两阶段优化配置方法流程图

Fig. 1 Flowchart of the multi-area two-stage optimal allocation method of large-scale energy storage

3 大容量储能多分区两阶段优化配置模型构建

3.1 第一阶段优化模型

以系统新能源消纳量为优化目标，建立以年度为时间周期的混合整数优化调度模型。该阶段优化模型中储能配置规模为常数。目标函数为

$$\max J = \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} (p_w^{t,n} + p_{pv}^{t,n}) \quad (6)$$

式中： $p_w^{t,n}$ 为区域 n 中的风电机组在第 t 时刻的发电功率； $p_{pv}^{t,n}$ 为区域 n 中的光伏机组在第 t 时刻的发电功率； N 为新能源受阻地区数目； T 为优化时段数目。

模型约束包括区域负荷平衡约束，旋转备用约束，区域电网内部传输断面容量约束，火电机组最小开关机、发电功率、发电功率爬坡率约束，新能源出力约束，储能充放电状态、充放电功率和SOC (state of charge) 状态约束等^[23-24]。

这里主要列出考虑储能出力影响后的系统旋转备用水平约束条件：

$$D^t + P_{re}^t + \sum_{n=1}^N p_{out}^{t,n} \leq \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{S_{kind}} P_j^{\max} \times S_j^{t,n} + \sum_{n=1}^N C_{pw}^{t,n} + \sum_{n=1}^N C_{ppv}^{t,n} + \sum_{n=1}^N (p_{disch}^{t,n} - p_{ch}^{t,n}) \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{S_{\text{kind}}} P_j^{\text{min}} \times S_j^{t,n} + \sum_{n=1}^N (p_{\text{disch}}^{t,n} - p_{\text{ch}}^{t,n}) \leq D^t + \sum_{n=1}^N p_{\text{out}}^{t,n} - N_{\text{re}}^t \quad (8)$$

式中： D^t 为系统在时段 t 上的负荷需求； P_{re}^t 为系统在时段 t 上的正备用需求； $p_{\text{out}}^{t,n}$ 为区域 n 在时段 t 上向系统外部输送的功率； S_{kind} 为火电机组种类数目； P_j^{max} 为机组种类编号 j 的火电机组的最大出力水平； $S_j^{t,n}$ 为机组种类编号 j 的火电机组 t 时段在区域 n 中的运行台数； $C_{\text{pw}}^{t,n}$ 为区域 n 中风电机组的可信发电水平； $C_{\text{ppv}}^{t,n}$ 为区域 n 中光伏机组的可信发电水平； $p_{\text{disch}}^{t,n}$ 为区域 n 中的储能第 t 时刻的放电功率； $p_{\text{ch}}^{t,n}$ 为区域 n 中的储能第 t 时刻的充电功率； P_j^{min} 为机组种类编号 j 的火电机组的最小出力水平； N_{re}^t 为系统在时段 t 上的负备用需求。

式(7)表示系统正备用需求约束，该约束表示在考虑系统风电和光伏可信发电水平的前提下，所有开机机组的最大发电功率与其他电源出力之和要能够满足系统的最大正备用需求，储能此时通过放电来保证系统备用容量充裕性。式(8)表示系统负备用需求约束，该约束表示在系统只调度常规火电机组和储能设备时，可以满足系统的最大负备用需求，此时储能通过充电来满足系统的负备用水平要求。

考虑风光出力的随机性，本文按照风光装机容量固定百分比来留取备用容量。风电、光伏的可信发电水平为

$$C_{\text{pw}}^{t,n} = \max \{ p_w^{t,n} - \lambda_w P_w^n, 0 \} \quad (9)$$

$$C_{\text{ppv}}^{t,n} = \max \{ p_{\text{pv}}^{t,n} - \lambda_{\text{pv}} P_{\text{pv}}^n, 0 \} \quad (10)$$

式中： λ_w 为需要给风电机组留取的备用容量水平，为风电装机的百分比； P_w^n 为区域 n 的风电装机容量； λ_{pv} 为需要给光伏电站留取的备用容量水平，为光伏装机的百分比； P_{pv}^n 为区域 n 的光伏电站装机容量。

3.2 第二阶段优化模型

3.2.1 优化模型

该阶段以满足新能源利用率要求的储能投资成本最低为优化目标，目标函数如下：

$$\min J = \sum_{n=1}^N C_{\text{battery}} N_{\text{battery}}^n + \sum_{n=1}^N C_{\text{inverter}} N_{\text{inverter}}^n \quad (11)$$

式中： C_{battery} 为储能电池单位容量投资成本； N_{battery}^n 为区域 n 中的储能电池安装容量； C_{inverter} 为储能逆变器单位容量的投资成本； N_{inverter}^n 为区域 n 中储能的逆变器容量。

约束条件为新能源利用率水平约束：

$$\sum_{n \in N} \sum_{t \in T} (p_w^{t,n} + p_{\text{pv}}^{t,n}) \geq \eta \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} (P_w^{t,n*} + P_{\text{pv}}^{t,n*}) \quad (12)$$

式中： η 为新能源利用率目标； $P_w^{t,n*}$ 、 $P_{\text{pv}}^{t,n*}$ 分别为区域 n 中的风电机组、光伏机组在第 t 时刻的理论最大发电功率。

根据式(11)和式(12)，储能配置规模越大，越容易满足新能源利用率水平，但储能配置规模越大，投资成本越高。从经济性角度考虑，该问题存在最低的储能配置容量，在该储能配置规模下，刚好可以满足新能源利用率水平约束。

3.2.2 求解思路

1) 更新优化区间端点。

假定对于当前新能源受阻地区，储能逆变器功率的优化区间为 $[N_{\text{inverter}}^{n,\text{left}}, N_{\text{inverter}}^{n,\text{right}}]$ ，储能电池容量的优化区间为 $[N_{\text{battery}}^{n,\text{left}}, N_{\text{battery}}^{n,\text{right}}]$ 。按照如下方式初始化设置优化区间的左右端点：

$$N_{\text{inverter}}^{n,\text{left}} = 0, N_{\text{inverter}}^{n,\text{right}} = M_1 \quad (13)$$

$$N_{\text{battery}}^{n,\text{left}} = 0, N_{\text{battery}}^{n,\text{right}} = M_2 \quad (14)$$

式中： M_1 和 M_2 为足够大的常数。

根据当前储能配置规模下系统新能源利用率是否能满足要求来更新优化区间。

假定第一阶段优化求解得到的区域电网实际新能源利用率为 η^* ，如果 $\eta > \eta^*$ ，则说明当前储能配置规模下系统新能源利用率不能满足要求，则更新储能逆变器功率优化区间和电池容量优化区间的左端点，右端点保持不变：

$$N_{\text{inverter}}^{n,\text{left}} = N_{\text{inverter}}^{n,\text{current}}, N_{\text{battery}}^{n,\text{left}} = N_{\text{battery}}^{n,\text{current}} \quad (15)$$

式中： $N_{\text{inverter}}^{n,\text{current}}$ 、 $N_{\text{battery}}^{n,\text{current}}$ 分别为第一阶段优化求解模型中当前的储能逆变器功率水平、储能电池容量水平。

如果 $\eta \leq \eta^*$ ，则说明当前储能配置规模下系统新能源利用率能满足要求，则更新储能逆变器功率优化区间和电池容量优化区间的右端点，左端点保持不变：

$$N_{\text{inverter}}^{n,\text{right}} = N_{\text{inverter}}^{n,\text{current}}, N_{\text{battery}}^{n,\text{right}} = N_{\text{battery}}^{n,\text{current}} \quad (16)$$

2) 更新储能配置规模。

根据更新后的优化区间端点，可以得到储能逆变器功率优化区间的长度为

$$\delta = N_{\text{inverter}}^{n,\text{right}} - N_{\text{inverter}}^{n,\text{left}} \quad (17)$$

假定有一非常小的常数 ϵ ，如果 $\delta > \epsilon$ ，表示储能规模需要继续优化。根据更新完的储能逆变器功率优化区间和电池容量优化区间左右端点值，采用二分法

分别更新当前新能源受阻地区内储能的逆变器功率和电池容量，同时其他新能源受阻地区的储能配置规模保持不变。

按照如下方式改变储能配置规模：

$$N_{inverter}^{n*} = \frac{N_{inverter}^{n,left} + N_{inverter}^{n,right}}{2} \tag{18}$$

$$N_{battery}^{n*} = \frac{N_{battery}^{n,left} + N_{battery}^{n,right}}{2} \tag{19}$$

式中： $N_{inverter}^{n*}$ 、 $N_{battery}^{n*}$ 分别为更新后的储能逆变器功率和储能电池容量。

3) 得到最优的储能配置容量。

如果 $\delta < \varepsilon$ ，则表示优化区间长度已经足够小，当前优化区间右端点对应储能配置规模即为当前新能源受阻地区最优的储能配置规模。

4 案例测试

4.1 案例介绍

以国内某典型省级电网为测试案例，该省级电网的典型性表现在三方面：①省内存在传输断面约束，新能源从一个地区送出存在受阻问题，省级电网可以划分为3个区域，满足对多分区储能优化配置的要求；②该省级电网中新能源装机比例高，新能源装机占省内电源总装机的29%，满足新能源大规模消纳的要求；③该省级电网中新能源弃电率高，未优化配置储能前，弃电率达23%，通过配置储能可以有效改善新能源消纳情况。

该省级电网中每个新能源受阻地区的电源都有火电、风电和光伏。其中区域1和区域2之间、区域2和区域3之间分别有一条传输线，3个区域之间的传输断面输电功率上限如表2所示。

表 2 区域传输断面输电功率上限

Table 2 Maximum security capacity of transmission line between different areas

线路编号	输电断面	输电功率上限/MW
L1	区域1-区域2（区域2-区域1）	1800
L2	区域2-区域3（区域3-区域2）	1500

每个区域的火电装机容量如表3所示。为了保证系统安全稳定运行，火电机组在每个时段上均有最小开机数量约束。

每个区域的风电机组、光伏电站装机容量如表4所示。在该案例中，需要给风电机组和光伏电站留取

的备用容量水平为装机容量的20%。

表 3 火电装机

Table 3 Capacity of thermal units

	区域1	区域2	区域3
火电装机/MW	12 530	800	1600

表 4 风电与光伏装机

Table 4 Capacity of wind power and photovoltaic power

	区域1	区域2	区域3
风电装机/MW	1 687.65	1555	2 051.66
光伏装机/MW	585	133	110

将每个区域内所有的储能电站等效为一个储能电站，等效储能电站的参数以锂离子电池为例给出，如表5所示。每个区域的初始储能配置规模如表6所示，用电负荷情况如表7所示。

表 5 储能电站参数

Table 5 Parameters of energy storage

充放电效率	最小荷电状态	最大荷电状态	逆变器单位容量投资成本/(万元·MW ⁻¹)	电池单位容量投资成本/(万元·(MWh) ⁻¹)
0.92	0	1	15	150

表 6 储能初始配置规模

Table 6 Initial capacity of energy storage

储能电池	区域1	区域2	区域3
逆变器功率/MW	200	100	150
电池容量/MWh	800	400	600

表 7 每个区域的最大用电负荷与最小用电负荷

Table 7 Maximum and minimum load in different areas

	区域1	区域2	区域3
最大负荷/MW	9102	1564	1359
最小负荷/MW	3420	303	252

4.2 测试结果分析

在初始储能配置规模下，该系统的新能源利用率仅为77%。考虑储能电池的满功率持续放电时间分别为4 h、6 h和8 h，分别优化求解满足一定新能源利用率的最优储能配置容量。

当新能源利用率要求为90%和95%时，系统不同区域的储能最优配置容量及投资成本分别如表8和表9所示。

表8 满足新能源利用率90%要求的储能最优配置容量及投资成本

Table 8 Optimal allocation capacity and cost of energy storage to meet the requirement of the renewable energy utilization rate of 90%

充电时长/h	功率或容量	区域1	区域2	区域3	投资成本/万元
4	逆变器功率/MW	2400	2500	2400	4 212 750
	电池容量/MWh	9600	10 000	9600	
6	逆变器功率/MW	2000	1900	1950	5 076 000
	电池容量/MWh	12 000	11 400	11 700	
8	逆变器功率/MW	1800	1700	1750	6 102 000
	电池容量/MWh	14 400	13 600	14 000	

表9 满足新能源利用率95%要求的储能最优配置容量及投资成本

Table 9 Optimal allocation capacity and cost of energy storage to meet the requirement of the renewable energy utilization rate of 95%

充电时长/h	功率或容量	区域1	区域2	区域3	投资成本/万元
4	逆变器功率/MW	26 400	27 500	26 400	49 107 750
	电池容量/MWh	105 600	110 000	105 600	
6	逆变器功率/MW	17 200	17 100	17 150	468 000 000
	电池容量/MWh	103 200	102 600	102 900	
8	逆变器功率/MW	13 700	13 100	13 150	48 262 500
	电池容量/MWh	109 600	104 800	105 200	

根据表8和表9的计算结果可以得到如下结论:

1) 考虑火电机组在各个时段上最小开机数量约束时, 如果要实现较高的新能源利用率(如95%), 需要大幅提高储能配置规模, 此时1 MWh的储能电量仅可以提高2~3 MWh的新能源上网电量。如果适当降低新能源的利用率要求(如从95%降低到90%), 则可以将储能配置容量及储能投资成本降低一个数量级, 此时1 MWh的储能电量可以提高超过40 MWh的新能源上网电量。

2) 提高储能满功率持续放电时间, 虽然可以减

少逆变器功率的配置规模, 但由于电池容量的增加, 储能系统总投资不一定会降低, 甚至可能会升高。当新能源利用率要求为90%时, 按满功率持续放电时间4 h配置储能系统, 投资成本最低; 当新能源利用率要求为95%时, 按满功率持续放电时间6 h配置储能系统, 投资成本最低。应该结合新能源利用率要求, 合理确定储能满功率持续放电时间。

5 结论

在综合考虑电网调峰、系统备用容量充裕性和新能源利用率后, 采用本文提出的两阶段求解算法, 可以得到电网侧多分区合理的储能配置容量。当系统中新能源利用率较低时, 通过合理配置一定量的储能容量, 可以显著提高新能源的利用率。新能源利用率目标过高, 单纯通过配置储能来满足利用率要求不具有经济性, 储能系统投资巨大, 应该考虑采取多种灵活性措施提升系统新能源消纳能力。一般而言, 当新能源利用率目标需要提升至90%时, 1 MWh的储能电量可以提高超过40 MWh的新能源上网电量, 若新能源利用率从90%提升至95%, 1 MWh的储能电量仅可以提高2~3 MWh的新能源上网电量。

参考文献

[1] 鲁宗相, 李昊, 乔颖. 从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 12-18.
LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 12-18(in Chinese).

[2] 赵福林, 俞啸玲, 杜诗嘉, 等. 计及需求响应的含大规模风电并网下电力系统灵活性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 42-51.
ZHAO Fulin, YU Xiaoling, DU Shijia, et al. Assessment on flexibility of a power grid with large-scale wind farm integration considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 42-51(in Chinese).

[3] MA Y R, HAN X S, YANG M, et al. Multi-timescale robust dispatching for coordinated automatic generation control and energy storage[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 355-364.

[4] 李翠萍, 张世宁, 李军徽, 等. 基于多储能系统的风电黑启动方案设计[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 643-652.
LI Cuiping, ZHANG Shining, LI Junhui, et al. Black-start

- scheme for wind-power generation based on multiple energy storage system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 643-652(in Chinese).
- [5] 王伟胜. 我国新能源消纳面临的挑战与思考[J]. 电力设备管理, 2021(1): 22-23.
WANG Weisheng. China's challenges and considerations regarding new energy consumption[J]. Electric Power Equipment Management, 2021(1): 22-23(in Chinese).
- [6] 国家发展改革委, 财政部, 科学技术部, 等. 关于促进储能技术与产业发展的指导意见[EB/OL]. (2017-10-12) [2021-04-16]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-10/12/content_5231304.htm.
- [7] 国家发展改革委. 关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见[EB/OL]. (2018-06-21)[2021-04-16]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201806/t20180629_960951.html.
- [8] 国家能源局. 关于2021年风电、光伏发电开发建设有关事项的通知[EB/OL]. (2021-02-26)[2021-04-16]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1693166905327912776&wfr=spider&for=pc>.
- [9] 国家发改委, 国家能源局. 关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见[EB/OL]. (2021-02-25)[2021-04-16]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202103/t20210305_1269046.html.
- [10] 周平, 孙悦, 康朋, 等. 光热电站的高比例可再生能源系统混合储能容量优化配置方法[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(3): 22-31.
ZHOU Ping, SUN Yue, KANG Peng, et al. Optimal hybrid energy storage capacity configuration for CSP integrated power systems with high renewable energy penetration[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(3): 22-31(in Chinese).
- [11] 程韧俐, 梁顺, 傅强, 等. 基于虚拟储能的微网风光储容量优化配置方法研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(3): 372-379.
CHENG Renli, LIANG Shun, FU Qiang, et al. Research on optimal configuration method of microgrid storage capacity based on virtual energy storage[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(3): 372-379(in Chinese).
- [12] 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: 1-12[2021-04-08]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201333>.
LI Jianlin, TAN Yuliang, WANG Han, et al. Research on configuration optimization of energy storage system in distribution network and optical storage microgrid[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-12[2021-04-08]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201333>.
- [13] 周京华, 翁志鹏, 宋晓通. 兼顾可靠性与经济性的孤岛型光储微电网容量配置方法[J/OL]. 电力系统自动化: 1-15[2021-04-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210129.0936.003.html>.
ZHOU Jinghua, WENG Zhipeng, SONG Xiaotong. Capacity configuration method of island microgrid integrated with photovoltaic and energy storage system considering reliability and economy[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-15[2021-04-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210129.0936.003.html>.
- [14] KARIMI A, AMINIFAR F, FEREDUNIAN A, et al. Energy storage allocation in wind integrated distribution networks: an MILP-Based approach[J]. Renewable Energy, 2019, 134: 1042-1055.
- [15] 徐雁飞, 宋天昊, 袁铁江, 等. 风-储联合发电系统容量优化配置及其影响因素分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 173-180.
XU Yanfei, SONG Tianhao, YUAN Tiejiang, et al. Capacity optimization configuration of wind-storage power generation system and analysis of its influencing factors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 173-180(in Chinese).
- [16] 刘颖明, 王瑛玮, 王晓东, 等. 基于蚁狮算法的风电集群储能容量配置优化方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 431-437.
LIU Yingming, WANG Yingwei, WANG Xiaodong, et al. Optimization of storage capacity allocation in wind farm cluster based on ant lion optimization algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 431-437(in Chinese).
- [17] 李捷, 杨霖. 基于小波变换与机会约束规划的风电储能容量配置[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(2): 37-42.
LI Jie, YANG Lin. Wind power storage capacity configuration based on wavelet transform and chance constrained programming[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2): 37-42(in Chinese).
- [18] 曹培芳, 张锋, 赵洪峰, 等. 新疆高光伏并网电网侧储能容量配置分析[J/OL]. 水力发电: 1-5[2021-04-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1845.TV.20210324.1508.004.html>.
CAO Peifang, ZHANG Feng, ZHAO Hongfeng, et al. Analysis of grid-side energy storage capacity with high proportion solar power in Xinjiang[J/OL]. Water Power: 1-5[2021-04-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1845.TV.20210324.1508.004.html>.
- [19] 金晨, 任大伟, 肖晋宇, 等. 支撑碳中和目标的电力系统源-网-储灵活性资源优化规划研究[J/OL]. 中国电力: 1-11[2021-05-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.tm.20210517.0901.002.html>.
JIN Chen, REN Dawei, XIAO Jinyu, et al. Optimization planning on power system supply-grid-storage flexibility resource for supporting the "carbon neutrality" target of China[J/OL]. Electric Power: 1-11[2021-05-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.tm.20210517.0901.002.html>.
- [20] 林敏怡, 雷勇, 李宇泽, 等. 基于改进量子粒子群算法的储能容量优化配置[J]. 电源技术, 2021, 45(2): 203-207.
LIN Minyi, LEI Yong, LI Yuze, et al. Capacity optimal research of hybrid energy based on optimized quantum particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Power Sources,

- 2021, 45(2): 203-207(in Chinese).
- [21] 杨晓雷, 徐建元, 陶欢, 等. 基于改进鲸鱼算法的储能系统优化配置研究[J]. 浙江电力, 2021, 40(3): 113-120.
YANG Xiaolei, XU Jianyuan, TAO Huan, et al. Study on optimal allocation of energy storage system based on improved WOA[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(3): 113-120(in Chinese).
- [22] 吴昌龙, 罗华伟, 秦正斌, 等. 基于双层规划的电网侧储能配置算法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2021(4): 85-93.
WU Changlong, LUO Huawei, QIN Zhengbin, et al. Analysis of grid-side energy storage configuration strategy based on Bi-level programming[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(4): 85-93(in Chinese).
- [23] 陆秋瑜, 胡伟, 闵勇, 等. 考虑时间相关性的风储系统多模式协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 6-12.
LU Qiuyu, HU Wei, MIN Yong, et al. A multi-pattern coordinated optimization strategy of wind power and energy storage system considering temporal dependence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 6-12(in Chinese).
- [24] 董存, 李明节, 范高峰, 等. 基于时序生产模拟的新能源年度消纳能力计算方法及其应用[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 166-172.
DONG Cun, LI Mingjie, FAN Gaofeng, et al. Research and application of renewable energy accommodation capability

evaluation based on time series production simulation[J]. Electric Power, 2015, 48(12): 166-172(in Chinese).

收稿日期: 2021-04-16; 修回日期: 2021-05-20。



袁伟

作者简介:

袁伟 (1989), 男, 博士, 工程师, 研究方向为新能源调度运行分析、新能源消纳能力计算、国内外新能源电力市场机制、储能在电网中的应用模式与机制、灵活资源优化配置等。通信作者, E-mail: bzyuanwei@126.com。

王彩霞 (1985), 女, 博士, 教授级高工, 长期从事新能源运行与消纳机制、新能源政策与技术经济性、大容量储能在电网中的应用等方面研究, E-mail: wangcaixia@sgeri.sgcc.com.cn。

李琼慧 (1969), 女, 硕士, 教授级高工, 长期从事能源电力发展战略规划、新能源战略规划以及新能源政策研究, E-mail: liqionghui@sgeri.sgcc.com.cn。

时智勇 (1983), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事新能源并网运行分析、新能源政策与消纳机制、新能源与电力市场、储能在电网中的应用分析等研究, E-mail: shizhiyong@sgeri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 张宇)