

## 储能系统与工程

# 一种考虑可再生能源不确定性的分布式储能电站选址定容规划方法

丁倩<sup>1</sup>, 曾平良<sup>1</sup>, 孙轶恺<sup>2</sup>, 徐辰婧<sup>2</sup>, 徐振超<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>杭州电子科技大学, 浙江 杭州 310018; <sup>2</sup>国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310020)

**摘要:** 储能具有响应快、灵活性强等特点, 可为电网提供多种辅助服务, 是消纳高比例可再生能源的重要灵活资源。随着储能成本的快速下降, 集中式、分布式储能在电网中的应用近年来得到了国内外研究者的广泛关注。本工作提出了一种考虑可再生能源出力不确定性的分布式电化学储能选址定容双层优化模型。首先, 建立计及可再生能源不确定性的电化学储能投资成本和运行成本最小的优化目标函数, 其次, 采用双层优化算法对储能选址和容量配置进行优化求解, 外层采用分支界定法确定储能的选址位置, 内层采用改进遗传算法得到最优容量配置与储能充放电运行策略, 最后, 以IEEE-39节点测试系统为例对所提方法进行仿真, 验证了该方法的正确性和运算效率。

**关键词:** 可再生能源并网; 储能选址定容; 双层优化算法; 分布式储能

doi: 10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0156

中图分类号: TQ 028.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2020) 01-162-08

## A planning method for the placement and sizing of distributed energy storage system considering the uncertainty of renewable energy sources

DING Qian<sup>1</sup>, ZENG Pingliang<sup>1</sup>, SUN Yikai<sup>2</sup>, XU Chenjing<sup>2</sup>, XU Zhenchao<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China; <sup>2</sup>State Grid Zhejiang Economy Research Institute, Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

**Abstract:** Energy storage is characterized by fast response and high flexibility and can provide several auxiliary services for a power grid, which is an important flexible resource that can absorb a considerable proportion of renewable energy. With the rapid decline in energy storage costs, the application of centralized and distributed energy storage in a power grid has recently become the focus of attention of international researchers. This study proposes a two-layer optimization model for the optimal placement and sizing of distributed electrochemical energy storage considering the uncertainty and intermittency associated with the renewable energy output. First, the study establishes an optimal objective function for electrochemical energy storage investment and operating costs considering the renewable energy uncertainty. Second, a two-layer optimization algorithm is applied to solve the sizing and placement of energy storage. The outer layer adopts the branch definition method to determine the energy storage location, whereas the inner layer uses the improved genetic algorithm to obtain the optimal capacity as well as the discharging/charging operation strategy of the storage system. Finally,

收稿日期: 2019-07-09; 修改稿日期: 2019-07-26。

第一作者: 丁倩 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为考虑可再生能源不确定性的分布式储能电网规划, E-mail: qding\_work@163.com;

联系人: 曾平良, 教授, 主要研究方向为电力系统规划、电力系统优化运行等, E-mail: plzeng@hotmail.com。

the proposed method is applied using the IEEE-39 bus test system, and the validity and efficiency of the proposed method are verified.

**Key words:** renewable energy integration; optimal placement and sizing; two-layer optimization algorithm; distributed energy storage

由于风电和光伏固有的随机性和间歇性等特点,大规模风电、光伏等可再生能源的快速发展对电网的安全稳定运行带来了极大地挑战<sup>[1]</sup>,主要包括:弃风弃光、调峰调频、功角与电压稳定等问题。将储能系统(energy storage system, ESS)接入电网可以提高系统的可靠性和稳定性,并能够有效调节和优化系统潮流,提高系统运行的经济效益,为大规模可再生能源并网问题提供了新的思路,是解决可再生能源接入电网的有效途径之一<sup>[2-5]</sup>。近年来,储能技术,特别是电化学电池储能,得到快速发展,电池储能成本也持续下降。但是,储能成本仍然相对较高,是储能技术(包括电池储能技术)在电网中大规模推广应用的重要制约因素之一,如何降低储能的投资成本和运行成本是储能投资规划需要解决的重要问题<sup>[6-7]</sup>。在电网中确定储能的最优选址和定容可有效降低整个系统成本。不合适的储能位置和容量配置将会导致局部电网过载、过电压或者欠电压等问题,增加系统的运行难度和成本。合理地选择储能建设位置和容量不仅能够使整个系统的经济效益最大化,还能改善和提高系统的稳定性和安全性<sup>[8]</sup>。

在优化储能配置的相关文献中,文献[9]介绍了一种适应平衡区域互联的最大储能需求分析方法,可缓解风力和光伏发电的波动性。文献[10]提出了一个基于AMPLCPLEX的线性规划模型,比较分析了储能对高比例间歇性可再生能源电网运行影响。但是这些方法缺乏成本/收益分析,不能全面评估储能的运行效益。文献[11]优化了储能系统的位置,提出了一种半定松弛法求解最优储能配置问题,但只考虑固定容量和功率的储能装置,忽略其规模和选址优化可能导致的投资决策不理想问题。

储能技术的迅速发展使得分布式储能在电力系统中得到广泛的应用<sup>[12]</sup>。分布式储能规划的目标函数主要包括两类,一类是储能投资成本和运行成本最小;另一类是储能净收益最大。文献[13]提出了一种以配电网公司和分布式电源所有者的收益最大为目标的选址定容规划方法。以最大弃风功率和一

天内最大弃风量分别作为储能的额定功率和容量来建立储能的选址定容规划模型。文献[14]提出缓解电价波动的储能运行策略,以配电网公司的年综合成本最小为目标,最后以模糊粒子群优化算法求解该储能规划模型。文献[13-14]均未考虑负荷出力的不确定性,因此均不能证明其储能规划方案的合理性。文献[15]构建了考虑延缓电网升级改造、网络损耗减小的储能收益、可靠性等综合价值评估模型,最后采用粒子群优化算法求解。文献[16]构建了储能净收益最大模型,最后以枚举法得到储能的最优配置。文献[17]构建了以储能投资成本净收益最大且考虑储能分时电价收益的最优模型,最后采用CPLEX求解模型。但是这些方法均未考虑储能节点对延缓电网升级改造的影响。

电池储能系统(battery energy storage system, BESS)是目前最具有成本效益的储能技术之一<sup>[18]</sup>,BESS的应用可以提高可再生能源消纳,提供系统辅助服务,如系统备用、频率调节和调峰等,增加电网的可靠性、稳定性和安全性。本文以BESS为研究对象,提出了一种考虑可再生能源不确定性的分布式储能电站选址定容规划方法,以储能投资成本和运行成本最小为目标。采用双层优化算法对系统储能的位置和容量进行优化,外层采用分支界定法确定储能的安装位置,内层采用遗传算法得到最优安装位置处的储能最佳容量和功率。本文以IEEE-39节点系统为例进行仿真,验证所提方法的正确性和运算效率。

## 1 分布式BESS选址定容规划模型

### 1.1 BESS储能模型

BESS的充放电特性可由以下五个参数给予描述,即容量、功率、充电和放电效率,自放电率和荷电状态。具体模型如下。

充电过程

$$S(t)=(1-\delta\Delta t)S(t-1)+P_i^c\Delta t\eta_c/C \quad (1)$$

放电过程

$$S(t)=(1-\delta\Delta t)S(t-1)-\frac{P_i^d\Delta t}{C\eta_d} \quad (2)$$

式中,  $S(t)$  为  $t$  时刻储能的荷电状态;  $\delta$  是自放电率;  $P_i^c(t)$  和  $P_i^d(t)$  分别是充电和放电功率;  $\eta_c$  和  $\eta_d$  分别是充电和放电效率;  $C$  是储能电站的容量。

储能电站与电网的功率交换可以由式 (3) 表示

$$P_i(t) = P_i^c(t) - P_i^d(t) \quad (3)$$

式中,  $P_i(t)$  是储能电站和电网之间的交换功率。对一个储能电站来说, 同一时刻的  $P_i^c(t)$  和  $P_i^d(t)$  值是互斥的, 即不能同时充电和放电, 由式 (4) 表示

$$P_i^c(t) \cdot P_i^d(t) = 0 \quad (4)$$

## 1.2 目标函数

规模化 BESS 接入配电网可以大幅改善配电网运行水平, 提高配电网消纳可再生能源的能力, 增强配电网的灵活性, 降低配电网损耗。BESS 可以采用最优充放电策略通过电价差获取运行经济效益。另一方面, BESS 的投资成本相对较高。因此, 本文 BESS 规划目标函数是使整个系统成本最小, 包括储能的投资成本, 充放电运行成本以及配电网网损。目标函数如式 (5) 所示

$$\min \sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} [z_i C_i p + \sum_t P_{ii}(t) \Delta tq(t) + \sum_t z_i P_i(t) \Delta tq(t)] \quad (5)$$

式中,  $N_{\text{bus}}$  为系统节点数;  $p$  是储能电站的单位容量造价;  $q(t)$  是  $t$  时刻的电价;  $z_i$  是  $i$  节点的储能投资变量, 可用式 (6) 表示

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{在 } i \text{ 节点装储能电站} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$P_{ii}(t)$  是  $t$  时刻流入  $i$  节点的有功功率总和, 如式 (7) 所示

$$P_{ii}(t) = \text{Real} \left\{ V_i(t) \left( \sum_{k=1}^{N_{\text{bus}}} Y_{ik} V_{ik} \right)^* \right\} = P_i^{\text{net}}(t) - P_i(t) \quad (7)$$

式中,  $P_i^{\text{net}}(t)$  是在  $t$  时刻  $i$  节点处的净有功注入功率, 它包括负荷、发电机和可再生能源出力, 但不包括交换功率  $P_i(t)$ 。  $V_i(t)$  表  $i$  节点上的电压,  $Y_{ik}$  是  $i$  节点与  $k$  节点之间的线路导纳,  $V_{ik}$  是  $i$  节点与  $k$  节点之间的电压。

## 1.3 约束条件

优化问题的约束分为两类: 一类是系统运行约束, 即系统在运行中应该满足的约束条件, 这类约束包括系统运行时每个时刻都要满足的功率平衡和在调度周期内的初始和终止时刻储能系统 SOC 应当保持一致; 另一类约束是设备特性约束,

包括储能系统和配电网系统, 以及为防止储能设备过充和过放, 其荷电状态 SOC、储能充放电功率等满足上、下限的约束。这些约束条件可表示如下。

### (1) 节点功率约束

$$P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (8)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (9)$$

其中,  $P_i$  和  $Q_i$  分别是  $i$  节点的有功和无功注入功率,  $V_i$  和  $V_j$  分别是  $i$  节点和  $j$  节点的电压,  $\theta_{ij}$  是  $i$  节点和  $j$  节点之间的电压相角差,  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别是  $i$  节点和  $j$  节点之间线路的电导和电纳。

### (2) 节点电压幅值和相角约束

$$\underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

$$\underline{\theta}_i \leq \theta_i \leq \bar{\theta}_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

式中,  $\underline{V}_i$  和  $\bar{V}_i$  分别是节点电压的最低和最高电压;  $\underline{\theta}_i$  和  $\bar{\theta}_i$  分别是节点电压相角的最小和最大相角。

### (3) 线路传输容量约束

$$P_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ij} \quad (12)$$

$$-\bar{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij} \quad (13)$$

式中,  $P_{ij}$  是  $i$  节点和  $j$  节点之间的线路潮流;  $\bar{P}_{ij}$  是  $i$  节点和  $j$  节点之间的最大线路传输容量。

### (4) 储能电站及其功率约束

$$\underline{S}_i \leq S_i \leq \bar{S}_i, \text{ for all } i \quad (14)$$

式中,  $\underline{S}_i$  和  $\bar{S}_i$  分别是储能电站最小和最大 SOC。通常 BESS 取  $\underline{S}_i = 0.1 \sim 0.2$ ,  $\bar{S}_i = 0.8 \sim 0.95$ 。此外, 为了确保储能电站在开始时能有充放电状态, 取 SOC 的初始值  $S(0) = 0.3 \sim 0.6$ 。

储能的充放电功率约束可表达为

$$0 \leq P_i^c \leq z_i \bar{P}_i^C \quad (15)$$

$$0 \leq P_i^d \leq z_i \bar{P}_i^D \quad (16)$$

式中,  $\bar{P}_i^C$  和  $\bar{P}_i^D$  分别是储能电站的最大持续充电和放电功率。

### (5) 储能电站的容量约束

$$C_i \leq \bar{C} \quad (17)$$

式中,  $\bar{C}$  是可允许安装的储能电站的最大容量, 且  $C_i$  大于零。

### (6) 储能电站数量约束

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} z_i \leq \bar{z} \quad (18)$$

式中， $\bar{z}$ 是最多可允许安装的储能电站的数量。

## 2 求解方法

本文采用双层算法求解储能的最优选址定容问题，即外层用分支界定法确定储能的选址问题，内层用遗传算法确定储能的容量和充放电运行问题。

### 2.1 外层优化问题

外层优化的决策变量为储能系统的配置位置，属于整数规划，本文采用的是分支界定法确定储能的位置。分支界定法可以用于求解纯整数或混合整数规划问题。这种方法灵活且便于计算求解。

分支界定法是对有约束条件的最优问题（其

可行解为有限数）的所有可行解空间恰当地进行系统搜索。其中分支是把全部解空间反复地分割为越来越小的子集，界定是对每个子集的解集计算一个目标下界。在每次分支后，若某个已知可行解集的目标值不能达到当前的界限，则将这个子集舍去。

### 2.2 内层优化问题

内层优化考虑了储能系统和发电机在风电水电典型日的情况。内层优化的决策变量为储能系统的容量和每一时刻的SOC值，是连续变量，本文采用遗传算法求解储能的容量、SOC值。内层优化的约束条件包含非线性潮流，本文通过调用Matpower工具箱进行配电网潮流计算。仿真环境是Matlab及Matpower工具箱和遗传工具箱，采用

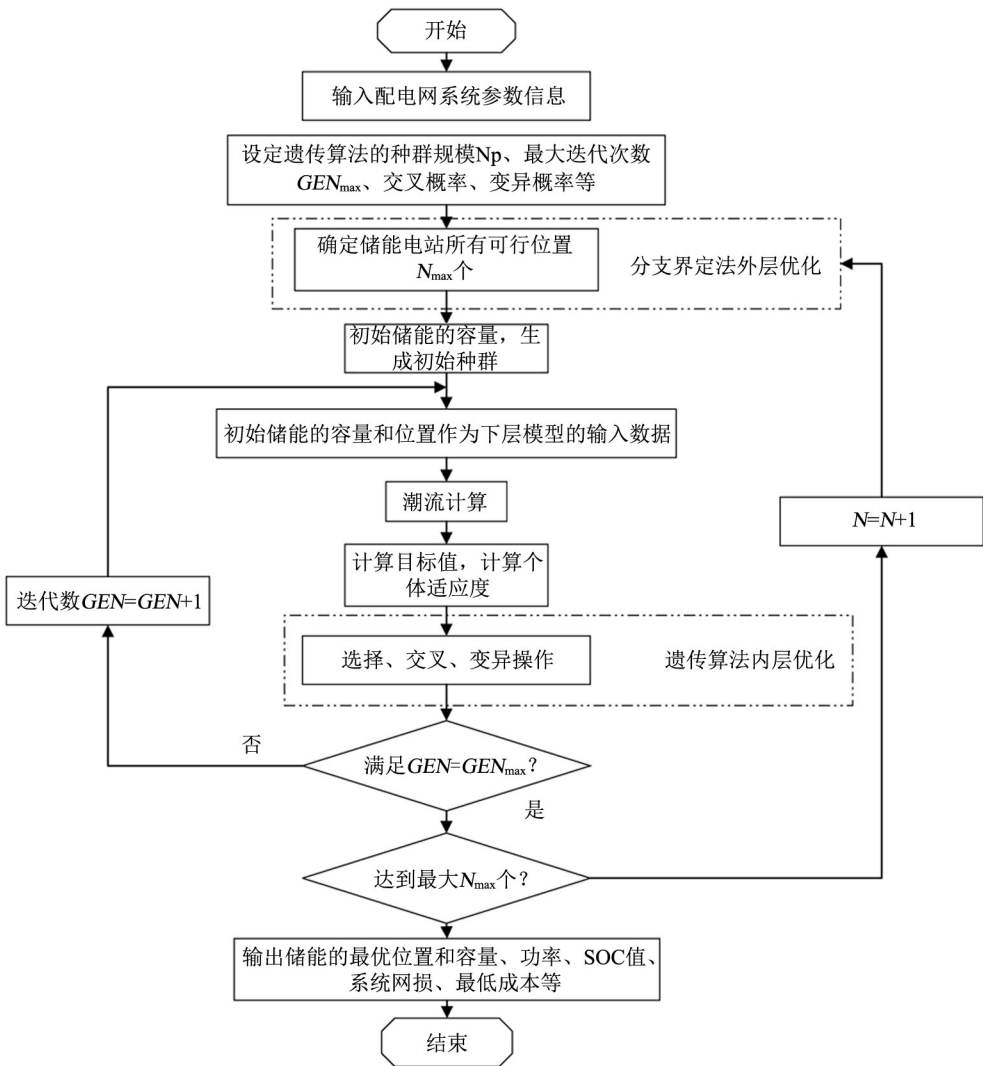


图1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart





表2 电池储能系统的相关参数  
Table 2 Parameters of the BESS

编号	性能指标	符号	数值
1	充电效率	$\eta_c$	95%
2	放电效率	$\eta_d$	95%
3	储能电站单位容量成本造价	$p$	2 ¥m/ (MW·h)
4	最大储能电站容量	$\bar{C}$	200MW
5	自放电率	$\delta$	0.1%
6	最大持续充电功率	$\bar{P}_i^C$	100MW
7	最大持续放电功率	$\bar{P}_i^D$	100MW
8	最小SOC值	$\underline{S}_i$	10%
9	最大SOC值	$\bar{S}_i$	95%
10	初始SOC值	SOC (0)	40%
11	末SOC值	SOC (T)	40%

### 3.2 结果分析

结果表明当储能系统接入节点21和节点39，储能容量均为199 MW·h时，整个系统的电网损

耗和运行成本最小，且总投资成本为601280万元。

储能系统的充放电功率曲线和SOC曲线如图5和图6所示。可以看出储能系统均在低谷时间段即0时至上午7时充电，储能SOC在该时间段逐渐增加，在高峰时间段（8—11），（17—21）储能系统放电，储能SOC在该时间段逐渐降低。同时还可以看出除了在低谷时段储能自动充电，在高峰时段储能自动放电外，在平谷时段，储能系统也能合理的自动地充放电。而且从图5和图6还可以看出，2个位置处的储能全天几乎都在运行，利用率极高，充分利用峰、平、谷电价差使储能收益最大化。为防止储能电站发生过充和过放，储能SOC的变化范围始终在0.1~0.95的范围内，且在一天的初始时刻和末时刻均保持在0.4，为下一天储能系统的正常运行作准备。

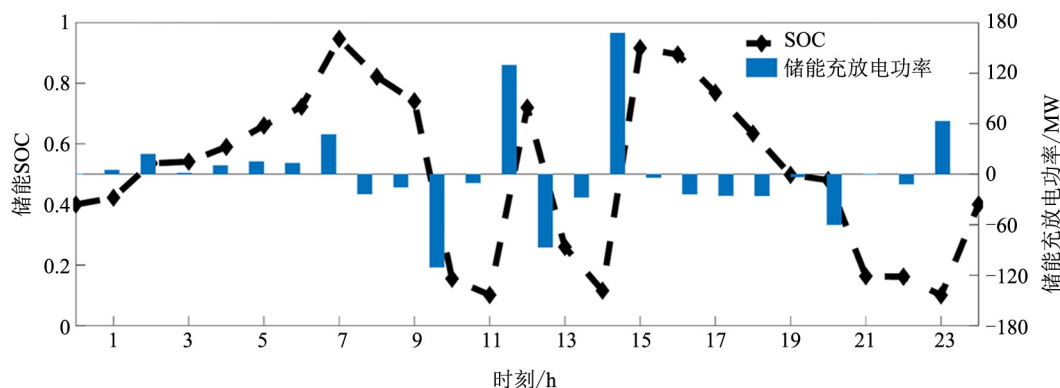


图5 21节点的储能充放电功率曲线和SOC曲线  
Fig.5 Energy storage charge discharge power curve and SOC curve in bus 21

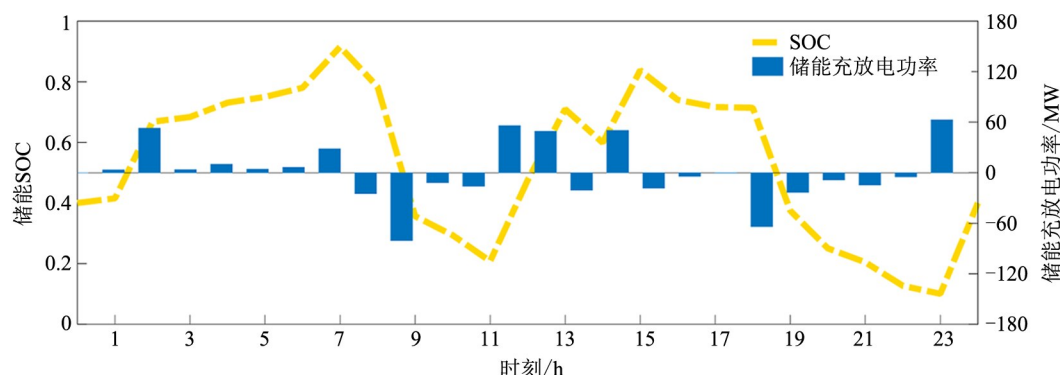


图6 39节点的储能充放电功率曲线和SOC曲线  
Fig.6 Energy storage charge discharge power curve and SOC curve in bus 39

以39节点结果为例，加储能系统前的负荷曲线与加储能后的负荷曲线的比较如图7所示。系统

总负荷与加储能后的等效负荷曲线的比较如图8所示。从图7和图8均可以看出，系统加入储能电站

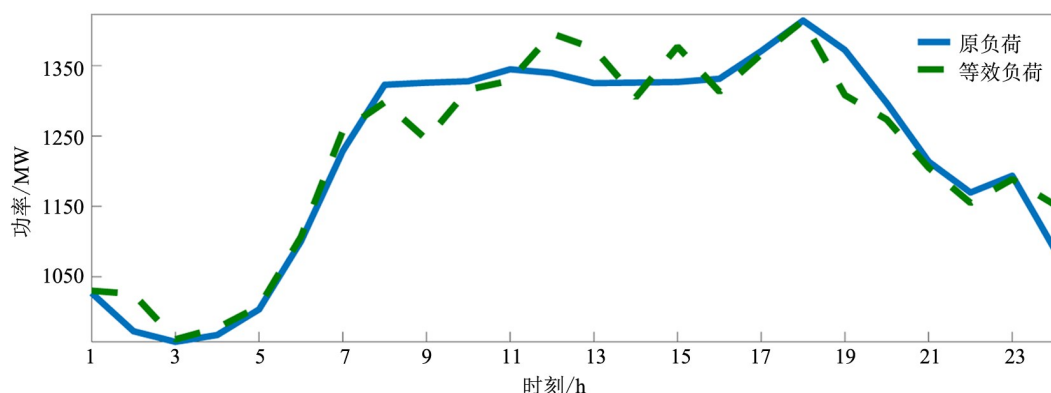


图7 39节点原负荷曲线和加储能后负荷曲线比较图

Fig.7 The comparison between load power and and equivalent load power in bus 39

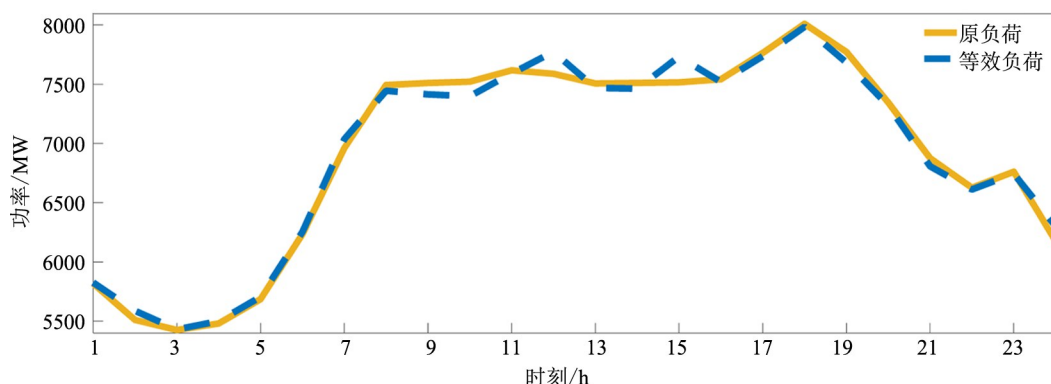


图8 系统总负荷曲线和加储能后负荷曲线比较图

Fig.8 The comparison between load power and and equivalent load power

后对负荷有一定的削峰填谷作用，最大限度地降低峰值负荷。

## 4 结论

本文针对高比例可再生能源配电网中的储能选址定容问题，提出了一种考虑可再生能源不确定性的分布式储能电站选址定容方法，建立综合考虑可再生能源出力和系统安全约束下的解决储能最优选址和定容问题的最优模型。文中假设系统的每个节点都可以安装储能系统，包括可再生能源发电节点、普通发电机节点和负荷节点，且其功率和容量统一设置一定范围内。

算例以IEEE-39节点系统为例进行仿真验证。算例结果表明，本文的方法最终可确定配电网储能系统的最佳位置以及在每个位置的储能容量和功率，满足经济上的合理性，使整个配电网系统的总成本最低；当配电网的负荷峰谷差较大时可利用BESS实现削峰填谷，解决大规模可再生能源

消纳和储能电站接入电网中其投资成本和运行成本过高的问题，有效提高配电系统整体的经济性。

## 参考文献

- [1] 李凯, 马倩, 徐红兵. 储能系统的荷电状态管理策略及其影响评价[J]. 电力系统自动化, 2015(8): 27-32.  
LI Kai, MA Qian, XU Hongbing. SOC management strategy of storage system and its impact assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(8): 27-32.
- [2] 丁明, 陈忠, 苏建徽. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 19-25.  
DING Ming, CHEN Zhong, SU Jianhui. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 19-25.
- [3] NICK M, CHERKAOUI R, PAOLONE M. Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2300-2310.
- [4] 李秀磊. 主动配电网中储能和需求侧响应的联合优化规划[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3803-3810.  
LI Xiulei. Integrated optimal planning of energy storage and demand side response in active power distribution network[J]. Power System

- Technology, 2016, 40(12): 3803-3810.
- [5] 赵金利, 于莹莹, 李鹏. 基于锥优化的储能系统参与配电网运行调节快速计算方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 30-35.  
ZHAO Jinli, YU Yingying, LI Peng. A fast calculation method of energy storage system for distribution network regulation based on conic programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 30-35.
- [6] 马会萌, 李蓓, 李建林. 适用于集中式可再生能源的储容配置敏感因素分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 328-334.  
MA Huimeng, LI Bei, LI Jianlin. Analysis on factors sensitive to capacity configuration of battery energy storage system suitable for centralized renewable energy sources[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 328-334.
- [7] 向育鹏, 卫志农, 孙国强. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置[J]. 电网技术, 2015(1): 264-270.  
XIANG Yupeng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang. Life cycle cost based optimal configuration of battery energy storage system in distribution network[J]. Power System Technology, 2015(1): 264-270.
- [8] RICARDO FERNÁNDEZ-BLANCO, DVORKIN Y, XU B, et al. Optimal energy storage siting and sizing: A wecc case study[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 733-743.
- [9] MAKAROV Y V, DU P, KINTNER-MEYER M C W, et al. Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 34-40.
- [10] SOLOMON A A, KAMMEN D M, CALLAWAY D. The role of large-scale energy storage design and dispatch in the power grid: A study of very high grid penetration of variable renewable resources[J]. Applied Energy, 2014, 134: 75-89.
- [11] BOSE S, GAYME D F, TOPCU U, et al. Optimal placement of energy storage in the grid[C]//Decision & Control, IEEE, 2012.
- [12] 李建林, 马会萌, 袁晓冬. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.  
LI Jianlin, MA Huimeng, YUAN Xiaodong. Overview on key applied technologies of large-scale distributed energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [13] ATWA Y M, EL-SAADANY E F. Optimal allocation of ess in distribution systems with a high penetration of wind energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4): 1815-1822.
- [14] ZHENG Y, DONG Z Y, LUO F J, et al. Optimal allocation of energy storage system for risk mitigation of DISCOs with high renewable penetrations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 212-220.
- [15] 颜志敏, 王承民, 郑健. 配电网中蓄电池储能系统的价值评估模型[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 57-61.  
YAN Zhimin, WANG Chengmin, ZHENG Jian. Value assessment model of battery energy storage system in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 57-61.
- [16] YANG Y, LI H, AICHHORN A, et al. Sizing strategy of distributed battery storage system with high penetration of photovoltaic for voltage regulation and peak load shaving[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 982-991.
- [17] THOMAS A, SAHA T K, DEEBA S R, et al. Evaluation of technical and financial benefits of battery-based energy storage systems in distribution networks[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(8): 1149-1160.
- [18] RIBEIRO P F, JOHNSON B K, CROW M L, et al. Energy storage systems for advanced power applications[C]//Proceedings of the IEEE, 2001, 89(12): 1744-1756.