

# 高比例风电接入的电力系统储能容量配置及影响因素分析

孙伟卿, 罗 静, 张 婕

(上海理工大学电气工程系, 上海 200093)

**摘要:** 储能技术是解决高比例风电消纳问题、提高系统可靠性的有效手段。然而储能不同的功能定位、典型负荷曲线与风电出力曲线的选取等都会影响储能的配置结果。为研究储能配置规律, 分别建立了考虑风电不确定性、风电爬坡以及风电消纳问题的多参数储能配置模型。研究储能不同功能定位下的配置情况。在此基础上, 基于单一变量原则以及相关性分析, 量化研究系统中各类参数对储能配置的影响。算例结果表明: 通过风电的合理接入可减少所需配置的储能容量, 合理的储能接入节点可有效降低网损; 单纯依靠储能解决风电消纳问题时所需配置的储能容量最大; 决定储能容量配置的价格型参数主要为分时电价; 系统型参数中对储能容量影响最大的是风电装机容量以及峰谷差率。

**关键词:** 储能容量配置; 影响参数; 不确定性; 爬坡特性; 参数分类; 配置规律

## Energy storage capacity allocation and influence factor analysis of a power system with a high proportion of wind power

SUN Weiqing, LUO Jing, ZHANG Jie

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Energy storage technology is an effective means of solving the problem of having a high proportion of wind power consumption and improving system reliability. However, the different function orientation of energy storage, and the selection of typical load and wind power output curves will affect the configuration result of energy storage. In order to study the rules of energy storage allocation, multi parameter energy storage allocation models considering the uncertainty of wind power, wind power climbing and wind power consumption respectively are established. The configuration of different functions of energy storage is studied. Then, based on the principle of single variable and correlation analysis, the influence of various parameters in the system on energy storage allocation is quantitatively studied. The results show that reasonable access of wind power can reduce the required energy storage capacity, and the reasonable access node can effectively reduce the network loss; the maximum energy storage capacity needs to be configured when only relying on energy storage to solve the problem of wind power consumption. The time of use price is the main price determining the allocation of energy storage capacity. Among the system parameters, the wind power installed capacity has the greatest impact on the energy storage capacity and peak valley difference.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777126).

**Key words:** energy storage capacity configuration; influence parameters; uncertainty; climbing characteristics; parameter classification; allocation rules

## 0 引言

近年来, 中国可再生能源取得巨大发展。截至2020年3月底, 全国累计风电并网装机容量达到2.13亿kW<sup>[1]</sup>。充分利用风能资源可达到绿色发展、

节能降耗的目的, 但是风力发电厂的特性与常规发电厂的特性不同, 风电是间歇性、波动性的, 大规模风能并网会给电网带来冲击。针对高渗透分布式风电接入配电网导致的安全性、可靠性方面的问题, 储能技术是保障风电消纳、提升系统经济效益的一种有效途径<sup>[2]</sup>。研究储能系统在电力系统中的功能定位与配置原则具有重要意义<sup>[3]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777126)

国内外学者针对储能在电力系统中的不同应用展开了大量研究,针对储能在解决风电爬坡、风电出力不确定、系统经济性方面,文献[4-6]建立了以运行总成本、储能综合净收益等为优化目标的平滑风电出力波动的储能优化模型。文献[7]从退役电池的二次利用方面,提出考虑老化成本的储能电池经济运行方法。文献[8-9]研究储能电池在二次调频、辅助服务等方面的应用,得到满足不同要求的储能电池配置方案。文献[10-12]考虑风电出力的时序特性,通过随机规划方法生成大量场景,以净收益最大化为目标函数建立优化模型,从而获得合理的储能优化方案。文献[13]建立了考虑多项成本的可调鲁棒规划模型,对配电网中的储能系统进行优化配置以应对分布式风电的不确定性。文献[14-16]以系统的成本最小为目标,并考虑电力系统安全性与可靠性,分析储能容量配置与最优布点方案。

针对储能的不同应用,很多论文侧重在单一方面对储能容量配置影响因素进行了研究,文献[17]建立了主动配电网中的混合储能配置模型,通过合理分配储能设备以及采用合适的需求响应方案降低系统所需储能容量。文献[18]建立了考虑风电不确定性的机会约束模型,分析了不同风电利用水平以及不同储能技术对储能配置的影响。文献[19]从电力市场下各因素变化时对经济性的影响出发,探究了不同储能上网电价对储能容量的影响,以寻求合理的投资价值区间。文献[20]研究了合理的储能容量对于提高微网规划经济性的影响。文献[21]简单分析了发电过量、能源不足和基本负载功率对最小化储能容量的作用。文献[22]建立了电池储能系统和需求响应两个方法参与调峰的联合优化模型,研究了随着电网公司与政府补贴的增加,可通过合理的储能配置及需求响应来提高系统盈利水平。但众多文献给出的研究成果缺乏对储能不同功能定位下储能容量的比较分析及储能配置多影响因素的影响程度的全面分析。

为全面探究储能不同功能定位对储能配置规模的影响,分析含多影响因素的场景集中影响储能配置的主要因素以及不同因素对储能配置的影响情况,本文首先对接入风电的节点进行分析,建立鲁棒优化配置模型,研究不同风电预测误差区间下需配置的辅助储能容量。再建立平抑风电爬坡的储能配置模型,研究不同风电爬坡率限制下的补偿储能容量配置。最后从配电网的角度出发,建立以系统成本最小为优化目标的储能配置模型,通过改变模型中的分时电价、网损电价、储能系统的单位成本等价格型参数,多次运算模型并采集数据,分析价

格型参数对储能容量的影响。针对电源侧的可再生能源,改变风电出力曲线、风电装机容量等,分析其对储能容量配置的影响,再研究在不同节点配置储能对于系统经济性的影响。本文将梳理影响储能配置的多种因素,为多变性系统的储能配置与规划运行提供决策依据。

## 1 计及多参数的配电网储能配置模型

储能技术在电力系统中作为一种保证电能质量和分布式发电高效利用率的有效途径,电力系统的任一环节都会影响储能容量配置。研究配电网中影响储能容量配置的因素时应首先明确配电网的模型以及储能在配电网中的作用。**本文根据不同的储能定位,考虑不同的约束条件,建立储能配置模型。**

### 1.1 考虑节点风电不确定性的储能鲁棒优化模型

由于存在预测误差,风电实际出力是不确定量,本文利用风电出力预测误差区间来描述其不确定性,并构建风储系统,使风储系统的实际出力追踪风电预测出力,从而解决风电出力的不确定性,该储能系统命名为辅助储能系统,由此建立以最小储能容量为目标函数的储能鲁棒优化配置模型,如式(1)一式(3)。

$$\min C_{-ess_i^f} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{wind,i,t}^{pre} - \alpha P_{wind,i,t}^{pre} \leq P_{wind,i,t}^r \leq P_{wind,i,t}^{pre} + \alpha P_{wind,i,t}^{pre} \\ P_{wind,i,t}^r - P_{ess,i,t}^f = P_{wind,i,t}^{pre} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} E_{ess,i,t}^f + P_{ess,i,t}^f \Delta t = E_{ess,i,t+\Delta t}^f \\ -P_{ess}^{f,max} \leq P_{ess,i,t}^f \leq P_{ess}^{f,max} \\ soc_{min} \leq E_{ess,i,t}^f / E_{ess,i}^{max} \leq soc_{max} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $E_{ess,i}^{max}$  为节点  $i$  上辅助储能系统的容量;  $P_{wind,i,t}^r$  为不确定性变量,代表节点  $i$  上风电在  $t$  时的实际出力;  $P_{wind,i,t}^{pre}$  为节点  $i$  上  $t$  时风电预测出力;  $\alpha$  为不确定性约束参数,其值决定风电出力预测误差区间大小;  $P_{ess,i,t}^f$  为节点  $i$  上辅助储能系统  $t$  时充放电功率;  $E_{ess,i,t}^f$  为节点  $i$  上辅助储能系统  $t$  时电量。辅助储能系统安装在风电并网节点,可降低风电出力预测的不确定性。式(2)决定了风电出力实际值与预测值之间的误差大小。式(3)表示储能的功率与电量的关系、充放电功率约束和荷电状态约束。

### 1.2 基于储能的节点风电爬坡平抑模型

风电出力波动性大,当风机并入电网时,其出力的爬坡特性会对电力系统运行稳定性产生影响,需对风电爬坡率进行限制。设定爬坡率的阈值为风电装机容量的  $\beta$  倍,在接入风电的电力系统节点配

置储能, 该储能定义为补偿储能系统, 建立以最小补偿储能容量为目标函数的风电爬坡平抑模型, 如式(4)一式(6)。

$$\min C_{ess_i}^b \quad (4)$$

$$-\beta \leq \frac{P_{wind,i,t+\Delta t} - P_{wind,i,t}}{cap_{wind,i} \Delta t} \leq \beta \quad (5)$$

$$P_{wind,i,t}^{pre} - P_{ess,i,t}^b = P_{wind,i,t} \quad (6)$$

式中:  $C_{ess_i}^b$  为节点  $i$  上补偿储能系统的容量;  $P_{wind,i,t}$  为节点  $i$  上经储能平抑后的风电  $t$  时的实际出力;  $cap_{wind,i}$  为节点  $i$  上风电装机容量;  $\beta$  定义为爬坡特性约束参数, 其值越大, 说明系统对接入的风电的要求越低;  $P_{ess,i,t}^b$  为节点  $i$  上  $t$  时的补偿储能充放电功率; 其余关于储能的约束与模型 1.1 中式(3)相同。式(5)表示系统的风电爬坡率不能超过其风电装机容量的  $\beta$  倍。系统的补偿储能系统需安装在风电并网节点, 解决风电爬坡问题。以上建立的模型可以保障风电安全可靠并入电网, 最终得到的风电出力曲线需代入电力系统进行消纳。

### 1.3 含储能的高比例能源电力系统最小成本模型

本文从配电网的角度考虑, 假定风力发电机组与储能设备都归配电网经营者所有。为了使系统完全消纳风电并保证系统运行的经济性, 需建立使系统成本最小的储能配置模型。配电网网损造成的能源浪费问题包含在主网购电功率中, 而由网损造成的线路与设备的发热问题等则需要单独增加网损一项来体现。网损费用作为一种惩罚性费用, 即在其电量电费的基础上额外增加计算的一种费用, 没有实际收取人, 作为供电公司网损管理的一种内部管理与激励机制。以某时间周期内的储能配置成本、主网购电成本和网损费用最小为优化目标, 目标函数如式(7)所示。

$$\begin{cases} \min F = F_{ess} + F_{loss} + F_{grid} \\ F_{ess} = \frac{T}{8760} \sum_{i=1}^N (\partial_e C_E^{inv} + C_E^{fix}) C_{ess_i} \\ \partial_e = \frac{r_{ess}}{1 - (1 + r_{ess})^{-h_{ess}}} \\ F_{loss} = \sum_{t=1}^T [\delta_{loss} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in c(i)} U_{ij,t}^2 / r_{ij}] \\ F_{grid} = \sum_{t=1}^T [\eta_t P_{grid,t}] \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $F_{ess}$  为 ESS 容量投资与运行维护成本;  $\partial_e$  为 ESS 投资年费用折算系数;  $r_{ess}$  为 ESS 贴现率;  $h_{ess}$  为 ESS 使用寿命;  $C_E^{inv}$  为单位容量 ESS 投资成本;  $C_E^{fix}$  为 ESS 单位容量年运行维护成本;  $T$  为运行周

期总小时数;  $N$  为节点总数;  $F_{loss}$  为网损成本;  $\delta_{loss}$  为网损电价;  $U_{ij,t}$  为支路  $ij$  在  $t$  时刻的电压;  $r_{ij}$  为支路  $ij$  的电阻;  $c(i)$  为所有以  $i$  为首端节点的末端节点集合;  $F_{grid}$  为主网购电成本;  $\eta_t$  为分时电价;

$P_{grid,t}$  为根节点在  $t$  时刻输入的有功功率;  $C_{ess_i}$  为节点  $i$  上的额定储能容量。电力网电能损耗率作为考核电网运行管理水平的一项重要经济指标, 在研究储能配置时引入网损电价<sup>[13]</sup>, 可突出网损对储能配置的影响, 从而提高配网能源调度上的经济性。针对网损电价的制定, 由文献[23]可知, 网损电价的 70% 以上取决于配电成本, 此外还反映了因违反热限制等导致的升级、运行和维护成本等。

约束条件考虑节点功率平衡约束、节点电压约束与储能约束等。

$$-P_{ess,i,t} + P_{wind,i,t} + P_{grid,t} - P_{load,i,t} = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in c(i)} [U_{i,t}^2 g_{ij} - U_{i,t} U_{j,t} (g_{ij} \cos \theta_{ij,t} + b_{ij} \sin \theta_{ij,t})] \quad (8)$$

$$U_i^{\min} \leq U_{i,t} \leq U_i^{\max} \quad (9)$$

$$\begin{cases} E_{ess,i,t}^f + P_{ess,i,t}^f \Delta t = E_{ess,i,t+\Delta t}^f \\ soc_{\min} \leq E_{ess,i,t}^f / E_{ess,i}^{\max} \leq soc_{\max} \\ -P_{ess,i}^{\text{charge,max}} \lambda_i \leq P_{ess,i,t} \leq P_{ess,i}^{\text{discharge,max}} \lambda_i \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_{ess,i,t}$  为节点  $i$  上  $t$  时刻的储能充放电功率,  $P_{wind,i,t}$  为节点  $i$  上  $t$  时刻风电出力;  $P_{load,i,t}$  为节点  $i$  上  $t$  时负荷;  $U_{i,t}$  和  $U_{j,t}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  在  $t$  时刻的电压幅值;  $\theta_{ij,t}$  为节点  $i$  与  $j$  在  $t$  时刻的电压相角差;  $g_{ij}$  与  $b_{ij}$  为节点  $i$  到  $j$  间的电导与电纳;  $\lambda_i$  为 0-1 变量, 值为 1 表示节点  $i$  处连有 ESS, 值为 0 时表示节点未连有储能系统;  $P_{ess,i}^{\text{charge,max}}$  和  $P_{ess,i}^{\text{discharge,max}}$  分别为储能系统的充、放电功率上限。

引入式(11)的新变量替换原有变量, 将非线性约束(8)转换为线性约束, 替换变量应满足约束(12), 再利用二阶锥松弛方法将式(12)松弛为式(13)。

$$\begin{cases} X_{i,t} = U_{i,t}^2 \\ Y_{ij,t} = U_{i,t} U_{j,t} \cos \theta_{ij,t} \\ Z_{ij,t} = U_{i,t} U_{j,t} \sin \theta_{ij,t} \end{cases} \quad (11)$$

$$X_{i,t} X_{j,t} = Y_{ij,t}^2 + Z_{ij,t}^2 \quad (12)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} 2Y_{ij,t} \\ 2Z_{ij,t} \\ X_{i,t} - X_{j,t} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq X_{i,t} + X_{j,t} \quad (13)$$

式(10)为存在 0-1 变量与连续变量乘积项的非



线性表达式, 可用 Big-M 法进行处理, 通过引入约束式(14), 约束(10)可以转化为式(15)。

$$\begin{cases} -M_1(1-\lambda_i) + P_{ess,i}^{charge,max} \leq V_1 \leq \\ \qquad M_1(1-\lambda_i) + P_{ess,i}^{charge,max} \\ -M_2(1-\lambda_i) + P_{ess,i}^{discharge,max} \leq V_2 \leq \\ \qquad M_2(1-\lambda_i) + P_{ess,i}^{discharge,max} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} -V_1 \leq P_{ess,i,t} \leq V_2 \\ -M_1\lambda_i \leq V_1 \leq M_1\lambda_i \\ -M_2\lambda_i \leq V_2 \leq M_2\lambda_i \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $M_1$ 、 $M_2$  为足够大的正数;  $V_1$ 、 $V_2$  为新增辅助变量。经过上述处理, 混合整数非线性规划模型转化为二阶锥规划模型。

2 电力系统储能配置影响参数

第 1 节建立的储能配置数学模型体现了影响储能配置的相关参数, 本节进一步归纳模型中的各类参数, 建立储能配置影响参数分析图, 如图 1 所示。

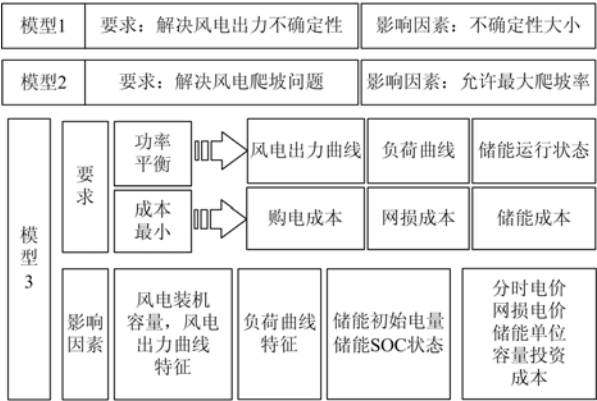


图 1 储能配置影响参数分析示意图

Fig. 1 Analysis schematic diagram of influence parameters of energy storage configuration

基于图 1, 从源-网-荷-储四方面分析三个模型中影响储能配置的参数。

2.1 电源侧影响参数

电源侧需要考虑可再生能源出力。选定与风电出力相关的参数有风机接入位置、描述风电预测误差区间不确定性的参数  $\alpha$ 、描述风电爬坡特性约束的参数  $\beta$  和风电出力曲线形状。

风电出力曲线比较复杂, 为兼顾计算量与准确性, 需选择合适的具有代表性的风电出力曲线。风电出力曲线形状的改变对储能配置的影响越大, 说明在储能实际规划过程中需要考虑的风电不同出力场景越多。其次需要探究并网容量对整个系统储能

容量的影响, 通过合理的风电接入, 减少需配置的储能容量, 降低系统成本。此外, 配电网中负荷所需电量除可再生能源提供之外, 还涉及到从主网购电。对于电源侧而言, 目标函数中含主网购电成本一项, 且影响主网购电功率大小的直接参数是分时电价, 可基于模型分析高峰电价、低谷电价、平段电价的改变对储能配置的影响。

2.2 电网侧影响参数

对于电网侧而言, 目标函数涉及到了网损费用, 影响其优化结果的最直接参数为网损电价。对于线路功率约束, 本文是研究电力系统中的储能配置情况, 而储能肯定配置在潮流的末端, 对系统潮流起整体调节作用, 因此忽略该约束条件。

2.3 负荷侧影响参数

对于负荷侧而言, 电力系统中的负荷受到了社会发展与人类生活习性的影响, 随时间会不断地发生变化, 在考虑影响储能配置的特征参数时, 要涉及到不同的负荷曲线。

2.4 储能系统影响参数

出于安全性与实用性的角度, 储能的充放电功率与 SOC 状态约束保持不变, 影响参数只选定模型 1.3 节中储能的单位投资成本。

3 基于储能配置模型的影响因素分析

本文利用第 1 节的储能配置模型, 来研究第 2 节中所选参数对储能配置容量的影响。首先对上述源-网-荷-储四种参数按约束型参数、价格型参数、系统型参数重新进行分类得到表 1。

表 1 参数特性分类表

Table 1 Parameter characteristics classification

参数类型	对应参数
约束型参数	不确定性约束参数 $\alpha$
	爬坡特性约束参数 $\beta$
价格型参数	网损电价
	分时电价-[低谷电价, 平谷电价, 高峰电价]
	储能单位容量投资成本 $C$
系统型参数	风电装机容量
	风电出力曲线
	负荷出力曲线

列出参数特性分类表可以更好地反映电力系统中各部分的运行规划对储能配置的影响。第一、第二个模型用于研究约束型参数对储能的影响, 第三个模型主要用来分析价格型与系统型参数。基于单一变量原则改变影响参数的值, 得到不同的储能容量配置结果, 再对不同的结果进行统计分析, 从而判定各类影响因素对储能配置容量的影响。探究各

类参数对储能容量配置影响的具体流程如图2。

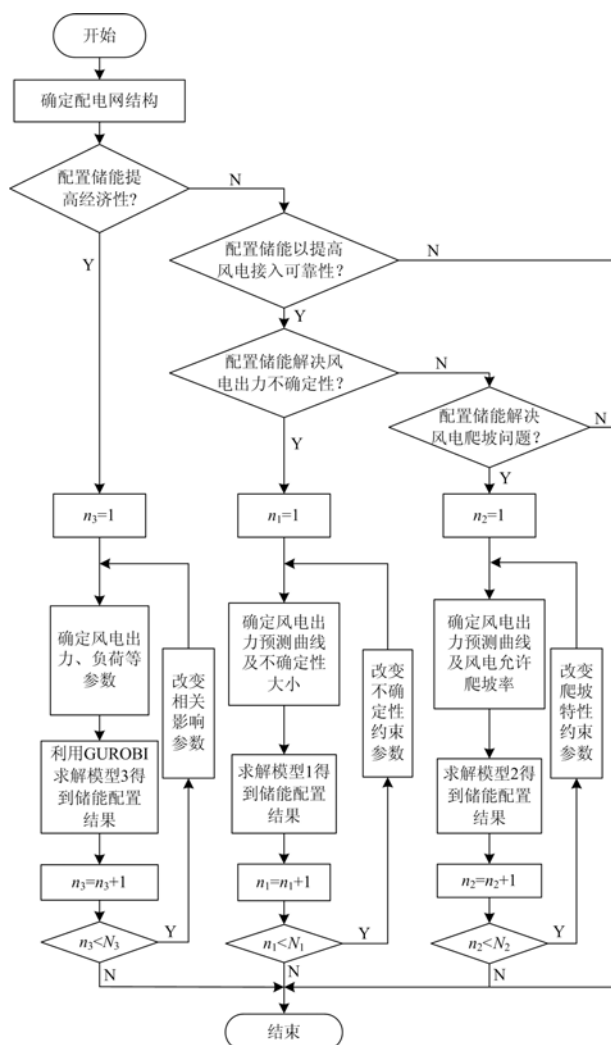


图2 参数分析流程图

Fig. 2 Flow chart of parameter analysis

为分析各参数对储能容量配置情况的影响程度,在模型中利用式(16)计算相关系数以衡量多个变量因素与储能配置容量的相关密切程度,从而量化各影响因素的重要程度。

$$\begin{cases} \text{var}(X) = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n}, \text{var}(Y) = \frac{\sum (Y - \bar{Y})^2}{n} \\ \varepsilon = \frac{E((X - \bar{X})(Y - \bar{Y}))}{\sqrt{\text{var}(X) \text{var}(Y)}} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\varepsilon$  为相关性系数;  $X$  代表影响参数;  $Y$  代表储能容量;  $\bar{X}$  代表影响参数的平均值;  $\bar{Y}$  代表储能容量的平均值;  $n$  代表数据量。

## 4 算例分析

本文在Matlab R2019a下建模,系统硬件条件为

Intel Core I5 CPU, 2.3 GHz, 8 GB内存。考察对象为33节点电力系统,如附录图A1所示,图中5、9、14、20、28、32节点上接入了额定容量为1 MW的风电机组,负荷曲线与风电出力曲线见附录图A2和A3,基准电压为12.66 kV,节点1上的电压恒定,其余节点最大电压偏差范围为0.9~1.1 p.u.。储能装置采用锂离子电池,参数见附录表A1。网损电价取1.0元/kWh<sup>[13,23]</sup>,分时电价见附录表A2。利用GUROBI求解模型3得到的储能优化配置方案如表2。

表2 储能配置情况

网损电价/ (元/kWh)	储能配置情况/ MWh	网损成本/元	储能每日 投资综合 成本/元	主网购 电成本/元	总成本/元
	8.17(5)				
1	0.93(16)	9 970	13 100	99 040	122 110
	2.09(28)				

## 4.1 系统型参数与储能需求量的关系

以节点5为研究对象,分析不确定性约束参数、爬坡特性约束参数与储能容量的关系,绘制成图3。

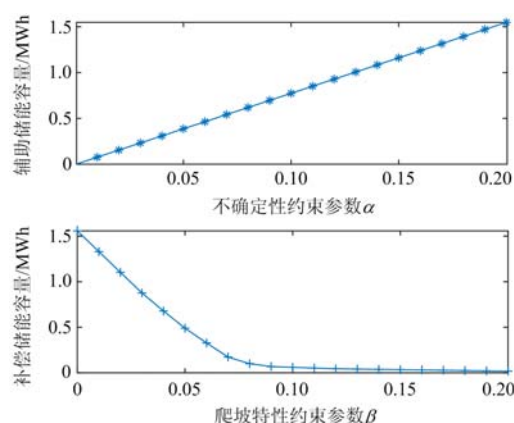


图3 约束型参数  $\alpha$ 、 $\beta$  与储能容量的关系曲线图

Fig. 3 Relation graphs of  $\alpha$  and auxiliary energy storage capacity,  $\beta$  and compensation energy storage capacity

由图3可得,储能需求量与不确定性约束参数呈正相关,即风电出力的不确定性预测误差区间越大,需配置的辅助储能系统容量越大,储能需求量与爬坡特性约束参数呈递减关系,即系统允许接入的风电爬坡特性越明显,所需补偿储能容量越小。

## 4.2 价格型参数与储能需求量的关系

分时电价对应的储能容量配置情况如附录表A4所示。各点储能容量基本不变,三个节点上的配置结果的平均值为: 8.28(5) MWh; 0.92(16) MWh; 1.99(28) MWh。配置范围为: 8.11~8.85(5) MWh; 0.76~0.95(16) MWh; 1.56~2.15(28) MWh。总储能

配置范围为11.17~11.20 MWh。由于目标函数包含三项，高峰时主网购电量减少，低谷时主网购电量增加，主网购电成本并未因分时电价升高而突增，而网损电价是固定值，在购电量变化的时段，网损功率也会变化，且网损成本不是单调变化的。

表3列出了三种不同网损电价对应的储能配置情况。由表3可以看出网损电价的改变对系统需配置的总储能容量并没有太大影响。随着网损电价的增加，5节点上需配置的储能容量减少，28节点上需配置的储能容量增加。说明在该系统节点28处配置储能相比于其他节点对网损电价反应更敏感。

表3 不同网损电价对应储能配置情况

Table 3 Corresponding energy storage configuration under different network loss electricity prices

网损电价/ (元/kWh)	储能配置情况/ MWh	网损成本/元	储能每日 投资综合 成本/元	主网购 电成 本/元	总成 本/元
0.5	8.40(5)	5 040	13 090	98 990	117 110
	0.93(16)				
	1.86(28)				
1	8.17(5)	9 970	13 100	99 040	122 110
	0.93(16)				
	2.09(28)				
1.5	8.11(5)	14 730	13 100	99 210	127 040
	0.95(16)				
	2.15(28)				

图4表示了储能单位投资成本与储能容量、系统成本的关系。由图4可知，储能容量随储能单位投资成本的变化是分段的。

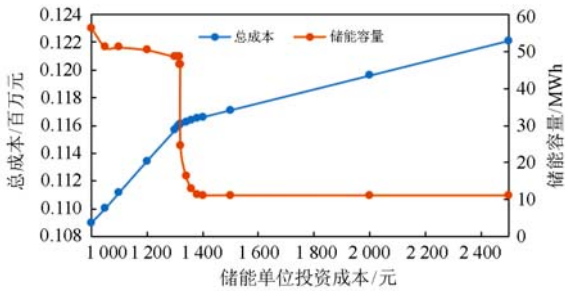


图4 不同储能单位容量投资成本下系统规划结果

Fig. 4 System planning results under different energy storage unit capacity investment costs

储能容量突变的拐点在储能单位容量投资成本为1319元时，表4为两种情况下的规划结果。

由表4可以看出，储能投资成本降到1320元之前，整个系统成本的降低主要依靠储能投资成本的减少，从1320元降到1319元时发生转变，系统成本的降低依靠主网购电成本的减少。单位投资成

本相差1元造成储能配置情况相差极大。在配置储能容量时，折算到一天的单位储能容量投资成本在0.6~0.7元区间时，要使目标函数最小，储能容量配置会有较大的变化，但系统的总成本差别不大，需要根据系统的要求来选择合理的储能容量。

表4 不同单位投资成本下的规划结果

Table 4 Planning results for different unit costs

储能单位 容量投资 成本/元	网损 成本/元	主网购电 成本/元	储能每日综合 投资成本/元	总成本/元
1 320	9 090	91 240	15 760	116 100
1 319	7 740	78 500	29 830	116 080

4.3 系统型参数与储能需求量的关系

改变接入配电网的风电曲线与负荷曲线，由模型3计算负荷曲线、风电出力曲线、风电装机容量与配置的储能容量之间的关系，如图5所示。不同类型的风电、负荷曲线对应于附录图A4、A5。

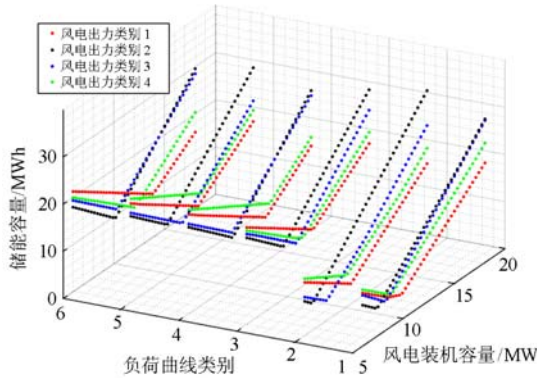


图5 不同风电曲线、负荷曲线对储能容量的影响

Fig. 5 Influence of different wind power curves and load curves on energy storage capacity

从图5可以看出，在负荷曲线与风电出力曲线相同的情况下，风电装机容量与储能容量之间的关系存在拐点，拐点之前随着风电装机容量增加，储能容量下降，拐点之后则相反，而负荷曲线以及风电出力曲线则影响拐点的坐标。拐点存在于风电装机容量与最大负荷之比约为1.26、净负荷峰谷差率约为1.67处，拐点对应的储能容量范围为4.30~12.99 MWh。整体来看，储能容量需求最低点存在于负荷曲线类别为2，风电曲线类别为3的情况下。该情况下风电装机容量与储能容量最优比约为8.1 MW/4.3 MWh，风电装机容量在8.1 MW的基础上每降低或升高1 MW时，储能容量增加约1.8 MWh。

利用式(16)计算出各参数与储能容量之间的相



关系数, 并绘制成图 6。图 6 中相关系数取值为  $[-1, 1]$ ,  $-1$  表示完全负相关,  $1$  表示完全相关。

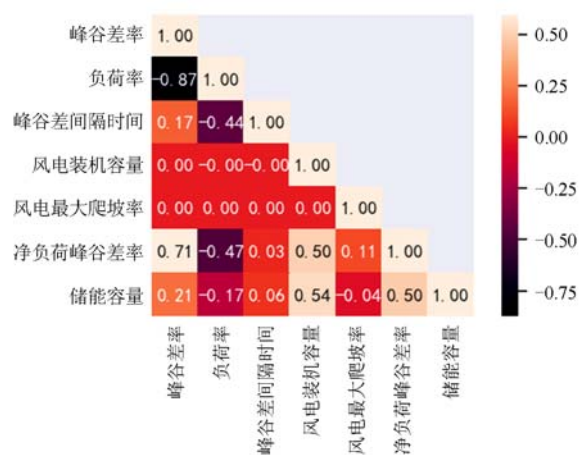


图 6 系统型参数与储能容量的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between system type parameters and energy storage capacity

由图 6 看出, 主要影响储能容量的因素是风电的装机容量以及峰谷差率。使储能容量最小的风电装机容量为  $8.1 \text{ MW}$ , 负荷峰谷差率为  $0.46$ , 净负荷曲线峰谷差率为  $1.43$ 。其中风电装机容量范围为  $6 \sim 18 \text{ MW}$ , 负荷曲线峰谷差率为  $0.46 \sim 0.6$ , 净负荷曲线峰谷差率最小值为  $0.79$ 。

总容量为  $15 \text{ MWh}$  的储能经由 3 个不同的节点接入, 其接入节点与购电量关系如图 7 所示。图 7 中每个箱体对应的五条横线由上至下分别表示最大值、上四分位数、中位数、下四分位数、最小值。图 7(a)中蓝色箱体表示储能的第 1 个接入位置为节点 3 时, 购电量所处范围。

相同的储能容量按照不同的节点接入配电网时对配网经济性的影响有很大差别, 节点 4、5 上接入储能设备对经济性的影响更大。因为储能接入的第一个位置为节点 3 时, 相较节点 4、5 接入储能的情况, 配电网的购电量范围更大, 说明在节点 3 配置

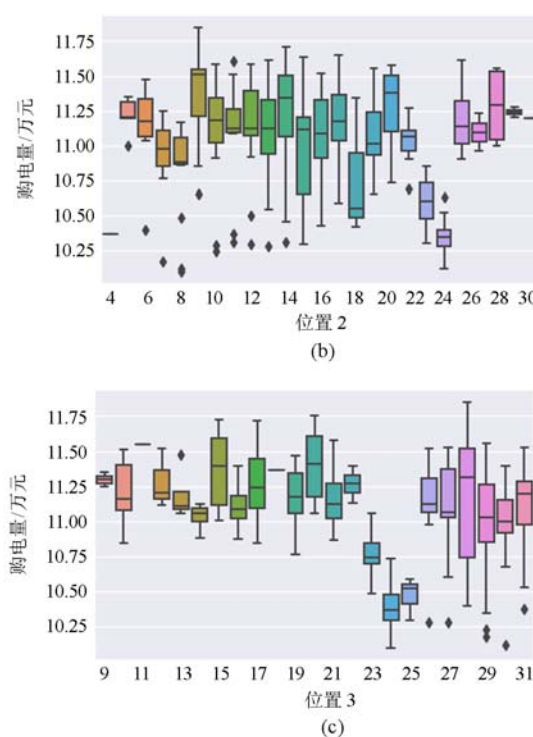
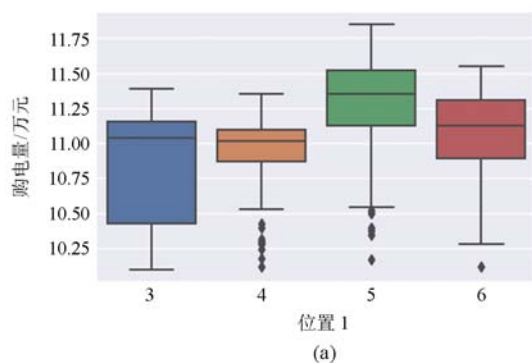
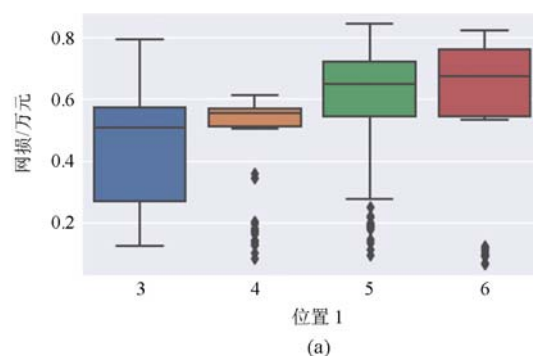


图 7 不同储能接入节点与购电量的分布关系

Fig. 7 Distribution relationship between different access nodes of energy storage and power purchase

储能对提高经济性的影响较小。根据图形中箱体的高度可大致确定储能接入节点对容量的影响。上四分位数与下四分位数所占的购电量范围越大, 对应节点单独接入储能对提高经济性的效果越不明显。

储能接入节点与网损的关系如图 8。根据网损值的分布发现, 在节点 23, 24, 25 配置储能可有效降低网损。节点 28 上配置储能对网损的影响小。不同节点接入储能对于降低网损、提高系统经济性有不同的效果, 在实际配置储能时需结合各节点配置效果与实际配置难度进行节点的选择。利用箱形图对储能接入不同节点的规划结果进行分析可明确各节点接入储能对降低网损、提高系统经济性的效果。



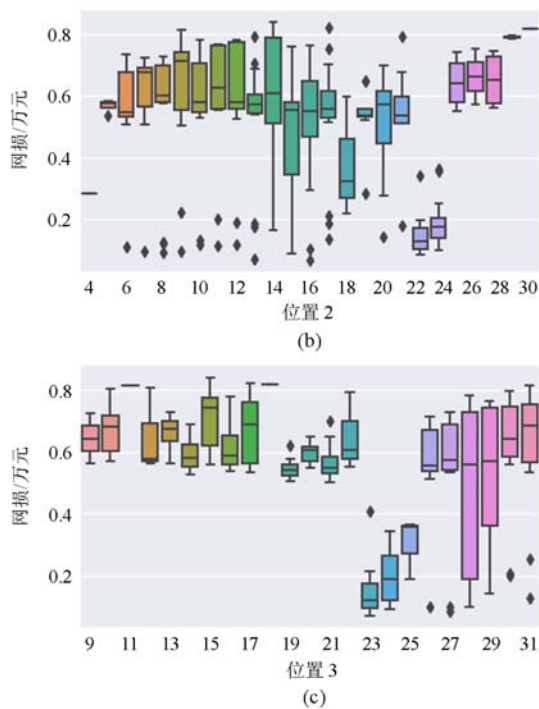


图 8 储能不同接入节点与网损的分布关系  
Fig. 8 Distribution relationship between different energy storage access nodes and network loss

5 结论

本文构建了考虑多种参数的储能配置模型，通过适当处理将混合整数非线性规划模型转化为混合整数二阶锥规划模型，最终通过算例仿真得出结论：

1) 配置储能可有效消纳风电，降低系统网损与购电成本，系统配置储能时应重点考虑分时电价与风电装机容量、负荷峰谷差率等关键因素。

2) 风电装机容量与最大负荷之比为 1.26 左右、净负荷峰谷差率为 1.67 左右时，所需配置的储能容量较小。

3) 系统中风机接入总容量过大时，为完全消纳风电，配置的储能容量会很大、导致系统成本激增。然而随着政策的引导、储能的快速发展，系统配置储能的经济性会得到提升。

附录

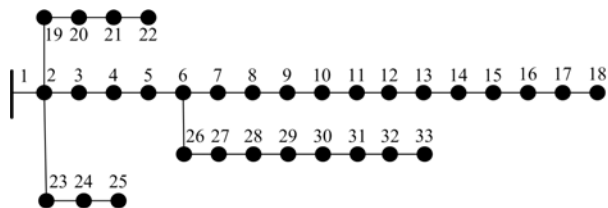


图 A1 33 节点配电网结构图  
Fig. A1 Network topology of IEEE 33-bus system

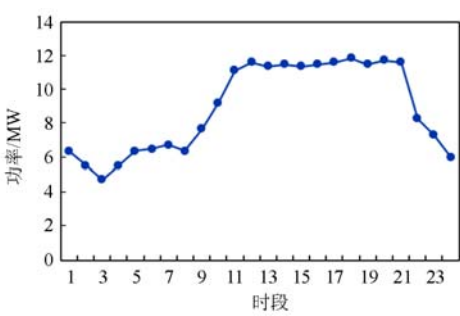


图 A2 负荷曲线

Fig. A2 load curve

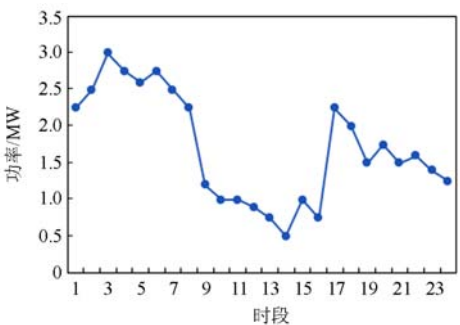


图 A3 风电出力曲线

Fig. A3 Wind power output curve

表 A1 锂电池相关参数

Table A1 Parameters related to lithium battery

参数	数值
额定容量/Wh	1 000
最大充放电功率/W	500
投资成本/元	2 500
运行维护成本/(元/年)	20
最大 SOC 状态	0.9
最小 SOC 状态	0.1
折现率	0.1
寿命周期/年	10

表 A2 分时电价对应表

Table A2 Time-of-use tariff meter

时段	电价/(元/kWh)
低谷时段：1—7	0.35
平谷时段：8，16—18，23—24	0.55
高峰时间：9—15，19—21	1

表 A3 分时电价不同取值

Table A3 Different values of time-of-use

元/kWh		
峰值电价	平段电价	低谷电价
1.2	0.66	0.28
1	0.55	0.35
0.8	0.44	0.42



表 A4 不同分时电价对应储能配置情况  
Table A4 Energy storage configuration under  
different TOU prices

分时电价/(元/kWh)	储能配置情况/MWh	总成本/元
0.80, 0.44, 0.28	8.15(5); 0.94(16); 2.11(28)	97 231
1.2, 0.44, 0.28	8.85(5); 0.76(16); 1.56(28)	123 779
1, 0.55, 0.28	8.17(5); 0.93(16); 2.09(28)	114 303
0.8, 0.66, 0.28	8.20(5); 0.93(16); 2.07(28)	103 897
1, 0.66, 0.28	8.11(5); 0.95(16); 2.15(28)	117 705
0.80, 0.44, 0.35	8.15(5); 0.94(16); 2.11(28)	98 645
1, 0.44, 0.35	8.35(5); 0.93(16); 1.91(28)	112 144
0.8, 0.55, 0.35	8.15(5); 0.95(16); 2.11(28)	102 134
1, 0.55, 0.35	8.17(5); 0.93(16); 2.09(28)	115 717
0.80, 0.44, 0.42	8.15(5); 0.94(16); 2.11(28)	100 058

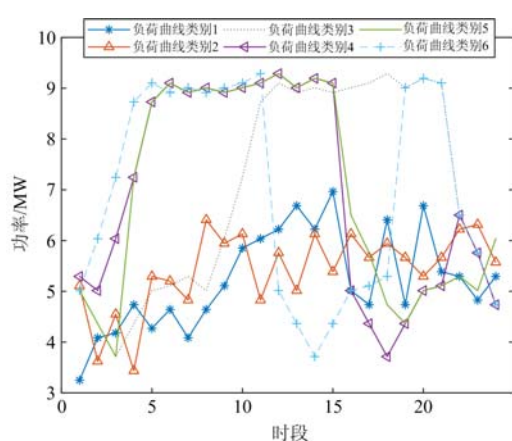


图 A4 不同类别负荷曲线

Fig. A4 Load curves of different types

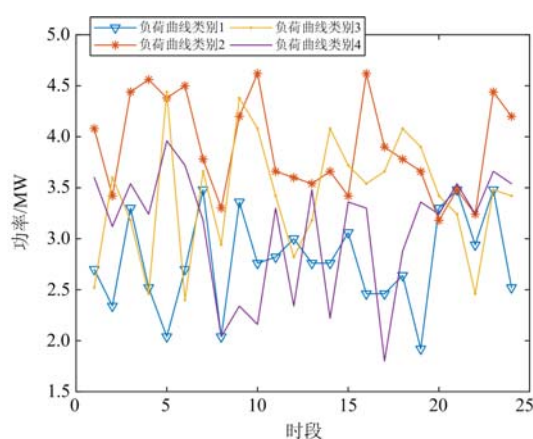


图 A5 不同类别风电出力曲线

Fig. A5 Wind power curves of different types

## 参考文献

[1] 2020 年一季度风电并网运行情况[R]. 北京: 国家能源局, 2020.

Renewable energy grid-connected operation in Q1'2020[R]. Beijing: National Energy Administration, 2020.

[2] 邵宁, 张慧媛, 王子琪, 等. 区域电网分布式储能选址定容规划[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 52-58.

GAO Ning, ZHANG Huiyuan, WANG Ziqi, et al. Planning for site selection and capacity determination of distributed energy storage in regional power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 52-58.

[3] 服务新能源发展报告[R]. 北京: 国家电网有限公司, 2020.

Service new energy development report[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2020.

[4] MOHAMMAD F, HANNAN M A, JERN K P, et al. Review of energy storage system technologies in microgrid applications: issues and challenges[J]. IEEE Access, 2018, 6: 35143-35164.

[5] ZHANG Shuai, BAI Xingzhen, GE Leijiao, et al. Optimal configuration of energy storage system considering uncertainty of load and wind generation[C] // 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 2 - August 7, 2020, Canada.

[6] YUN Pingping, REN Yongfeng, XUE Yu. Energy storage optimization strategy for reducing wind power fluctuation via Markov prediction and PSO method[J]. Energies, 2018, 11(12).

[7] SUN Jinlei, PEI Lei, LIU Ruihang, et al. Economic Operation optimization for 2nd use batteries in battery energy storage systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 41852-41859.

[8] 汤杰, 李欣然, 黄际元, 等. 以净效益最大为目标的储能电池参与二次调频的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 963-972.

TANG Jie, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation with the goal of maximum net benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 963-972.

[9] 孙丙香, 李旻熙, 龚敏明, 等. 参与 AGC 辅助服务的锂离子电池储能系统经济性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4048-4061.

SUN Bingxiang, LI Yangxi, GONG Minming, et al. Study on the economy of energy storage system with lithiumion battery participating in AGC auxiliary service[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4048-4061.

[10] 石玉东, 刘晋源, 徐松, 等. 考虑时序特性的配电网风-光-储随机规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 23-32.

SHI Yudong, LIU Jinyuan, XU Song, et al. Integrated

- wind-photovoltaic-storage stochastic planning model considering time-varying characteristics in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 23-32.
- [11] 蔡霖霖, 徐青山, 袁晓冬, 等. 基于风电消纳时序场景的电池储能系统配置策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 993-1001.
- CAI Jilin, XU Qingshan, YUAN Xiaodong, et al. Configuration strategy of large-scale battery storage system orienting wind power consumption based on temporal scenarios[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 993-1001.
- [12] 桑丙玉, 姚良忠, 李明杨, 等. 基于二阶锥规划的含大规模风电接入的直流电网储能配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 86-94.
- SANG Bingyu, YAO Liangzhong, LI Mingyang, et al. Research on energy storage system planning of DC grid with large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 86-94.
- [13] 唐权, 胥威汀, 叶希, 等. 考虑聚合商参与的配电网分布式储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 83-92.
- TANG Quan, XU Weiting, YE Xi, et al. Optimized configuration of distributed energy storage system in distribution network considering the participation of aggregators[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 83-92.
- [14] 赵峰, 李颖, 高锋阳, 等. 主动配电网中广义电源对储能系统配置的影响[J]. 太阳能学报, 2020, 41(1): 349-357.
- ZHAO Feng, LI Ying, GAO Fengyang, et al. Influence of generalized power sources on configuration of energy storage system in active distribution network[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(1): 349-357.
- [15] 焦东东, 陈洁, 付菊霞, 等. 平抑风电功率波动的储能容量配置[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 66-73.
- JIAO Dongdong, CHEN Jie, FU Juxia, et al. Configuration of energy storage capacity for suppressing fluctuation of wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 66-73.
- [16] 罗庆, 张新燕, 罗君, 等. 基于正负效益的储能削峰填谷容量配置[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 91-97.
- LUO Qing, ZHANG Xinyan, LUO Jun, et al. Allocation of peak storage and valley filling capacity based on positive and negative benefits[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2): 91-97.
- [17] HASAN M, REZA H. Modeling and optimal scheduling of battery energy storage systems in electric power distribution networks[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 234(10): 810-821.
- [18] LI Yunhao, WANG Jianxue, GU Chenjia, et al. Investment optimization of grid-scale energy storage for supporting different wind power utilization levels[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6): 1721-1734.
- [19] 李笑蓉, 黄森, 丁健民, 等. 基于 MILP 的用户光储系统储能配置场景适应成本分析[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(5): 25-30.
- LI Xiaorong, HUANG Sen, DING Jianmin, et al. MILP-based scenarios adaptation cost analysis of energy storage capacity sizing for user side PV and storage system[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(5): 25-30.
- [20] 谢桦, 滕晓斐, 张艳杰, 等. 风/光/储微网规划经济性影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 99-111, 167.
- XIE Hua, TENG Xiaofei, ZHANG Yanjie, et al. Analysis of economic influence factors in wind-photovoltaic storage microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 99-111, 167.
- [21] BITARAF H, RAHMAN S. Reducing curtailed wind energy through energy storage and demand response[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 228-336.
- [22] 胡泉, 徐国栋, 尚策, 等. 工业园区参与调峰的电池储能-需求响应联合规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 116-126.
- HU Xiao, XU Guodong, SHANG Ce, et al. Joint planning of battery energy storage and demand response for industrial park participating in peak shaving[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 116-126.
- [23] JAYASEKARA N, MASOUM M A S, WOLFS P J. Optimal operation of distributed energy storage systems to improve distribution network load and generation hosting capability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 7(1): 250-261.

收稿日期: 2020-10-31; 修回日期: 2021-01-14

作者简介:

孙伟卿(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能电网、电力系统分析评估与优化; E-mail: sidswq@163.com

罗静(1995—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统储能。E-mail: 1036631895@qq.com

(编辑 葛艳娜)