



## 储能系统和新能源发电装机容量对电力系统性能的影响

陈海东<sup>1</sup>, 蒙飞<sup>1</sup>, 王庆<sup>1</sup>, 侯峰<sup>2</sup>, 王亦<sup>3</sup>, 张志华<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>国网宁夏电力有限公司; <sup>2</sup>国网宁夏电力有限公司培训中心, 宁夏 银川 750001;

<sup>3</sup>国网宁夏电力有限公司石嘴山供电公司, 宁夏 石嘴山 753000; <sup>4</sup>国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 随着“双碳”目标的不断推进, 新能源发电装机容量将持续增长, 由于新能源发电具有不稳定性, 因此分析新能源装机容量与储能系统容量增加对电网性能的影响具有重要意义。本工作以某省电网为对象, 参考其电网组成建立了包含风电、光伏、火电和储能在内的电力系统调度模型, 应用信息间隙决策理论和蒙特卡洛方法模拟了用户负荷和新能源发电的不确定性。研究表明: 当新能源装机量翻倍时, 新能源发电量占比可以提高62.6%, 但运行成本也会提高18.7%。当储能系统容量从0 GW提高至15 GW时, 可使运行成本降低14.4%, 新能源发电量占比提高22%。同时发现, 当新能源消纳率低于95%时, 储能容量的提高将主要带来新能源消纳的提高; 当消纳率高于95%时, 储能容量的提高将显著降低电网波动性。该研究对未来低碳能源和智能电网建设中新能源和储能系统装机容量的配置具有一定的指导意义。

**关键词:** 储能系统; 电力系统; 新能源; 装机容量; 蒙特卡洛方法; 信息间隙决策理论

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0439

中图分类号: TM 74

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2023) 02-477-09

## Influence of installed capacity of energy storage system and renewable energy power generation on power system performance

CHEN Haidong<sup>1</sup>, MENG Fei<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>, HOU Feng<sup>2</sup>, WANG Yi<sup>3</sup>, ZHANG Zhihua<sup>4</sup>

(<sup>1</sup>State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd.; <sup>2</sup>State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Training Center, Yinchuan

750001, Ningxia, China; <sup>3</sup>State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Electricity Supply Company of Shizuishan, Shizuishan 753000, Ningxia, China; <sup>4</sup>State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Institute of Electricity Science, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

**Abstract:** With the continuous advances in carbon peaking and carbon neutrality goals, the installed capacity of renewable energy will continue to grow. However, renewable energy power generation is unstable. Therefore, it is essential to analyze the impact of changes in the installed capacity and energy storage system capacity of renewable energy on power grid performance. Considering wind power, photovoltaic power, thermal power, and energy storage, a power system dispatch model of one province grid is proposed in this study, and information gap decision theory and the Monte Carlo method are used to simulate the uncertainty of user load and renewable energy power generation. The simulation results show that, when the installed capacity of renewable energy is doubled, the proportion of renewable energy power generation

increases by 62.6%; also, the operating cost increases by 18.7%. When the energy storage system capacity is increased from 0 to 15 GW, the operating cost decreases by 14.4%, and the proportion of new energy power generation increases by 22%. In addition, when the new energy consumption rate is lower than 95%, an increase in energy storage capacity will mainly increase the new energy consumption; when it is higher than 95%, an increase in energy storage capacity will significantly reduce the power grid volatility. This study provides certain guiding significance for configuring the installed capacity of renewable energy and energy storage systems for constructing low-carbon energy and smart grids in the future.

**Keywords:** energy storage system; power system; renewable energy; installed capacity; Monte Carlo method; information gap decision theory

我国的电力供应依然以火电为主，2022年第一季度风电和光伏发电量占全国总发电量比例仅为13.4%。随着持续推进“双碳”目标和能源供给侧改革，我国的风电和光伏等新能源发电将逐步替代火电，迎来更大的发展空间。宁夏具有丰富的风光资源，截至2022年11月，新能源装机占比达到44.5%，新能源发电占比达到24%，远超全国整体水平。但是新能源发电具有较大的波动性和不确定性，会对电网稳定性造成冲击，必须配备储能系统以提高电网对新能源发电的消纳能力<sup>[1-3]</sup>。因此，宁夏提出集中式光伏项目需配备适当的储能系统，并计划在2025年实现储能容量不低于新能源装机的10%和最大负荷的5%。研究新能源装机容量和储能系统装机容量变化对电力系统性能的影响具有重要的实际意义。

在考虑新能源不确定性的电力系统调度建模与优化方面，张晋华等<sup>[4]</sup>考虑海上风力发电机组出力的不确定性，建立风-火联合调度模型，应用乌鸦搜索优化算法制订了全局优化调度方案。贺强等<sup>[5]</sup>考虑风电与光伏出力的不确定性，提出了基于改进拉丁超立方蒙特卡洛法的潮流计算方法，有效降低了系统计算误差。潘晓杰等<sup>[6]</sup>将机组停运考虑在内，提出了考虑负荷侧不确定性的电力系统安全风险评估方法，对电力系统调度模型进行了优化。李峰等<sup>[7]</sup>全面考虑了电网中源荷两侧的不确定性，利用高斯过程回归和时序分段典型场景提取方法，得到全调度区间的典型场景集。崔杨等<sup>[8]</sup>、宋晓芳等<sup>[9]</sup>和陈海东等<sup>[10]</sup>分别以风电消纳水平最高、电力系统频率稳定性最高和全生命周期成本最低为目标，考虑源荷两侧不确定性，对电力系统调度模型进行了优化。余东等<sup>[11]</sup>利用多项式混沌展开描述电力系统内

的源荷不确定性，再使用非线性有源回归模型表征电网的动态特性，提高了电力系统时域仿真不确定性分析的效率。

在储能系统对电网性能影响的研究方面，陟晶等<sup>[12]</sup>应用带有电加热功能的光热储能电站提高风电消纳能力，以系统运行成本最低为目标确定了调度方案。郭琛良等<sup>[13]</sup>和陈晓光等<sup>[14]</sup>分别以提高风电消纳和降低发电成本为目标，对某风电场应配备的锂电储能容量进行了配置优化。余全全等<sup>[15]</sup>和杨晓雷等<sup>[16]</sup>考虑风电的不确定性，分析了混合储能系统对风力发电系统经济性和电压稳定性的影响，并优化了储能系统的配置方案。杨文强等<sup>[17]</sup>综合考虑不同储能系统的技术特性，运用时间尺度小波分析等方法开发了混合储能系统配置方案。张昊<sup>[18]</sup>则以提高新能源消纳为目标，研究了分布式储能系统的配置优化，并使用IEEE-33节点进行了验证。张雪菲等<sup>[19]</sup>考虑配电网中光伏出力和用户负荷的不确定性，以成本最小和碳排放最少等为目标对储能系统容量进行了优化配置。唐雨薇<sup>[20]</sup>建立了储能系统数据分析模型，并以降低线损和提高效率为目标，完成了对大规模分布式化学储能系统的容量配置优化。

综上所述，现有的研究在研究对象和研究内容上是不全面的。考虑不确定性建模和分析方面，着重于对既定电网组成的调度分析，缺少新能源装机快速增加对电网性能影响的分析。在储能系统对电网作用的研究上，关注的焦点是储能系统对提高风电或者光伏消纳能力的作用，对模型中源荷两侧的不确定性的分析不足，缺少储能系统对电力系统整体影响的分析。因此，本工作建立了包含风电、光伏、火电和储能在内的电力系统调度模型，在充分

考虑风电、光伏和用户侧的不确定性的基础上，分析了储能系统装机容量、新能源发电装机容量提高对电力系统发电成本、稳定性、新能源发电占比等多指标的综合、协同影响。

## 1 电力系统模型

从组成部分来看，电力系统由用户侧负荷、风力发电机组、光伏发电机组、火力发电机组和储能系统五部分组成。根据不同部分的性能特征建立数学模型。

### 1.1 用户侧负荷模型

根据国家能源局和发改委发布的各省电网工作日的典型日负荷曲线(图1)，选取某省的典型日负荷数据作为本工作的日负荷情况进行建模与分析。

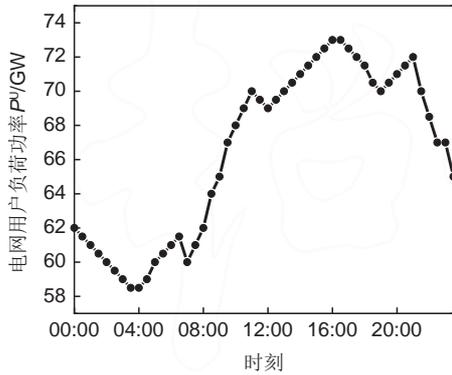


图1 某省的典型日负荷曲线

Fig. 1 Typical daily load curves for one province

典型日负荷曲线是一段时间的日负荷变化的整体情况但不能作为每日的实际负荷。因此，电力系统的实际日负荷曲线应在典型日负荷曲线周围一定范围内上下波动，应用信息间隙模型有：

$$\begin{cases} P_t^U \in \Gamma(\alpha, P_{0,t}^U) \\ \Gamma(\alpha, P_{0,t}^U) = \left\{ P_t^U; \left| \frac{P_t^U - P_{0,t}^U}{P_{0,t}^U} \right| \leq \alpha, \alpha \geq 0 \right\} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $P_t^U$ 为实际负荷； $P_{0,t}^U$ 为典型日负荷曲线对应的典型负荷值； $\alpha$ 为用户负荷波动率。

### 1.2 风力发电和光伏发电模型

根据丁志勇<sup>[21]</sup>和刘昊等<sup>[22]</sup>的风电场短期功率预测和风力发电机组功率特性，得到标准次日风力发电功率预测曲线。根据《民用建筑热工设计规程》(JGJ 24—86)得到一天内光照强度随时间的变化，得到次日光伏发电功率预测曲线。图2为风电和光

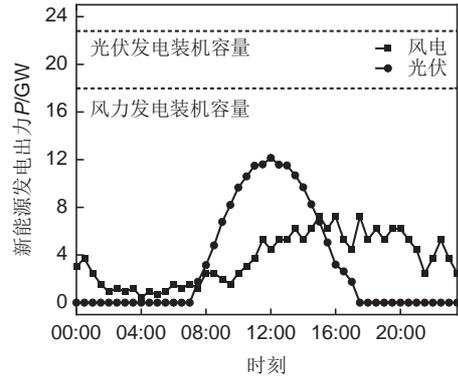


图2 风电和光伏的发电功率预测

Fig. 2 Prediction of wind power and photovoltaic power generation

伏的典型次日功率预测曲线。在次日功率预测曲线基础上，应用信息间隙模型，即可得到风力发电和光伏发电机组的实际出力情况。

$$\begin{cases} P_t^W \in \Gamma(\beta, P_{0,t}^W) \\ \Gamma(\beta, P_{0,t}^W) = \left\{ P_t^W; \left| \frac{P_t^W - P_{0,t}^W}{P_{0,t}^W} \right| \leq \beta, \beta \geq 0 \right\} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_t^P \in \Gamma(\gamma, P_{0,t}^P) \\ \Gamma(\gamma, P_{0,t}^P) = \left\{ P_t^P; \left| \frac{P_t^P - P_{0,t}^P}{P_{0,t}^P} \right| \leq \gamma, \gamma \geq 0 \right\} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\beta$ 和 $\gamma$ 分别为风力发电和光伏发电的波动率； $P_t^W$ 和 $P_t^P$ 分别为风电和光伏在 $t$ 时刻的实际出力； $P_{0,t}^W$ 和 $P_{0,t}^P$ 分别为风电和光伏在 $t$ 时刻的日前预测出力。

### 1.3 火力发电模型

火力发电机组为电力系统中的受控部分，在电力系统中占比最高，主要承担基荷与调峰调频任务。火力发电机组容量分为发电容量与备用容量：

$$\begin{cases} P^F = P_G^F + P_B^F \\ P^F \leq P_{\max}^F \end{cases} \quad (4)$$

式中， $P_G^F$ 和 $P_B^F$ 分别为火力机组的发电容量和备用容量。

火电机组作为电网可控部分的重要组成，在调峰调频的过程中需要快速调整出力，此时火电机组的出力爬坡率为：

$$\begin{cases} \Delta P_{G,t}^F = \frac{P_{G,t+\Delta t}^F - P_{G,t}^F}{\Delta t} \\ \Delta P_{G,t}^F \leq \Delta P_{\max}^F \end{cases} \quad (5)$$

式中， $\Delta P_{G,t}^F$ 为火电机组 $t$ 时刻的负荷变化率； $P_{G,t}^F$ 为火电机组 $t$ 时刻的实际出力。

### 1.4 储能系统模型

储能系统并不承担基荷，由于其优异的响应速度，在电力系统中承担主要的调峰调频任务。因此，储能系统的爬坡率为：

$$\begin{cases} \Delta P_{G,t}^S = \frac{P_{G,t+\Delta t}^S - P_{G,t}^S}{\Delta t} \\ \Delta P_{G,t}^S \leq \Delta P_{\max}^S \end{cases} \quad (6)$$

式中， $\Delta P_{G,t}^S$ 为 $t$ 时刻储能系统的负荷变化率； $P_{G,t}^S$ 为 $t$ 时刻储能系统的实际出力。

在此基础上，储能系统的最高充放电功率不得超过其装机容量的上限，因此有：

$$|P_t^S| \leq P_{\max}^S \quad (7)$$

### 1.5 总运行成本

总运行成本包含了风力发电机组的发电成本与弃风惩罚成本；光伏发电机组的发电成本与弃光惩罚成本；火力发电机组的发电成本、旋转备用成本和调峰调频成本；储能系统的调峰调频成本。数学表达如下：

$$C_{\text{sum}} = \sum_{t=0}^{24} C_G^W + C_W^W + C_G^P + C_W^P + C_G^F + C_B^F + C_P^F + C_P^S \quad (8)$$

式中， $C_{\text{sum}}$ 为总运行成本； $C_j^i$ 为对应各部分的

成本，其中上标表示不同设备， $i=W、P、F、S$ 分别表示风电、光伏、火电和储能系统，下标表示不同功能， $j=G、B、P、W$ ，分别表示发电成本、备用成本、调峰成本和弃风惩罚；所有成本均为无量纲指标。

## 2 数值算例与结果讨论

蒙特卡洛方法非常适合描述运行过程中的各种随机现象，是评估随机性系统效能的重要模拟方法。本工作以蒙特卡洛方法为基础，模拟用户日负荷、风力发电和光伏发电负荷的随机性，并分析风电、光伏和储能装机容量对电力系统性能的影响<sup>[23-28]</sup>。

图3为调度系统的运行流程。本系统优先保障风电和光伏上网，火电负责基荷，火电与储能共同承担调峰任务。首先根据日前功率预测拟订当日各机组的出力计划，然后应用蒙特卡洛方法按照给定的波动率生成实际的风电出力、光伏出力和日负荷曲线。当各机组实际出力与出力计划不一致，则开始调峰动作。在调峰动作中，首先计算负荷偏差是否超过调峰能力上限，若不超过上限则直接进行调

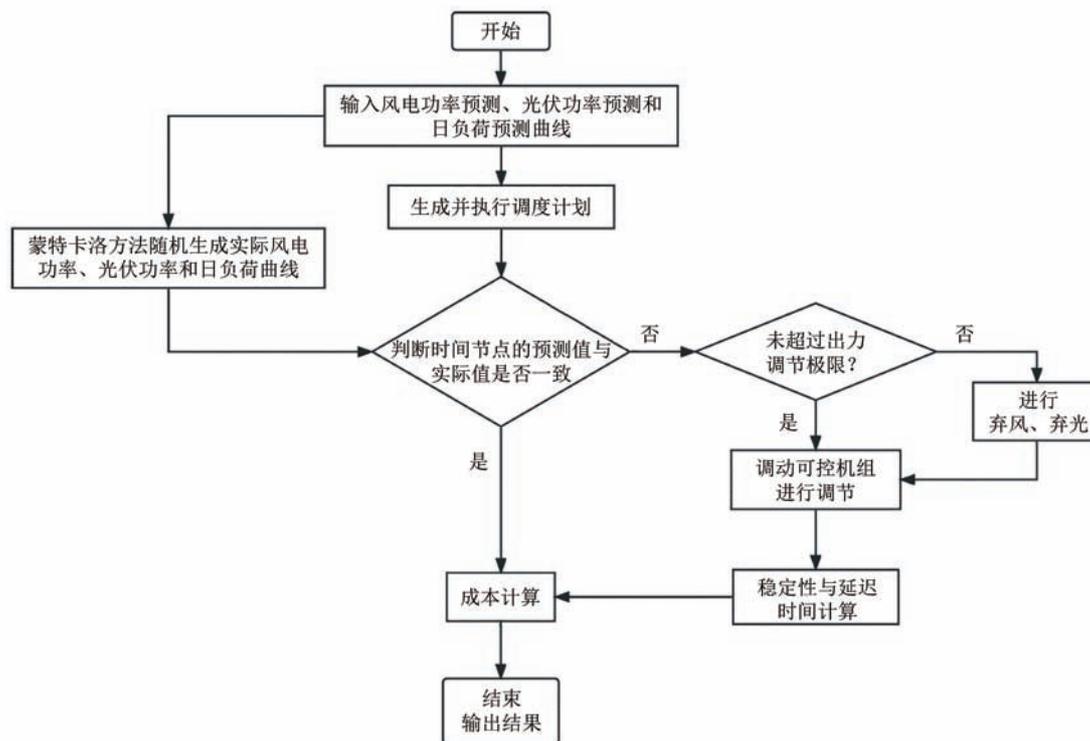


图3 应用蒙特卡洛方法的不确定性电力系统调度模型

Fig. 3 Uncertain power system dispatch model applying Monte Carlo methods

峰；若超过上限则在进行调峰的同时发生弃风。最后，计算系统的运行成本、负荷波动率和新能源发电占比等指标。

## 2.1 参考电网的性能模拟

表1为国家发改委发布的2020年某省电网的典型日负荷以及各类发电机组的装机容量。

表1 某省电网火电与新能源发电装机容量

Table 1 Installed capacity of thermal power and renewable energy power generation in one provincial power grid

项目	火力发电	风力发电	光伏发电
装机容量/GW	111	18	22.7
年利用时间/h	—	1798	1225

电网中不配备储能系统时，通过运行1000次蒙特卡洛实验，可得到该省电网的各性能指标平均值见表2。

表2 某省电网蒙特卡洛实验结果平均值

Table 2 The average value of Monte Carlo experiment results of one provincial power grid

总运行成本	频率波动率/%	负荷调节时间/s	新能源发电占比/%	新能源消纳率/%
1018.9	0.21	52.8	9.86	96.8

## 2.2 储能系统容量对电网性能的影响

储能系统具有快速响应的特点，可以有效降低火电机组的备用容量，提高运行经济性，提高新能源消纳率，降低电力系统的碳排放。但储能系统的容量配备需要与当前电网中火电、风电和光伏的容量相匹配，为了研究不同电网场景下储能系统容量对电网性能的影响，表3列出了4个电网装机容量场景。

表3 4种电力系统装机容量场景

Table 3 Power system installed capacity in 4 scenarios

项目	场景			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
火电装机容量/GW	111	100	111	100
风电装机容量/GW	18	18	27	27
光伏装机容量/GW	22.7	22.7	34	34

图4~图8为通过蒙特卡洛实验得到的4种电力系统场景下、储能系统容量从0 GW提高至15 GW过程中，电力系统性能指标的变化情况。

由图4可见，在4种场景内运行成本均随着储

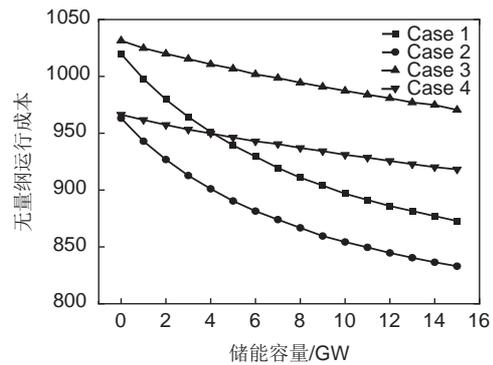


图4 储能系统容量变化对电力系统运行成本的影响

Fig. 4 The impact of energy storage system capacity changes on power system operating cost

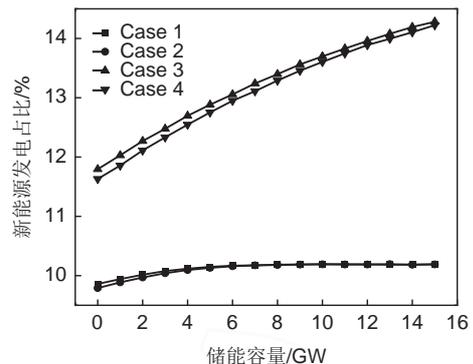


图5 储能系统容量变化对新能源发电占比的影响

Fig. 5 The impact of energy storage system capacity changes on the proportion of renewable energy generation

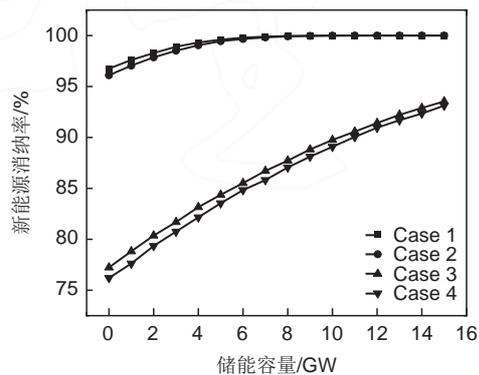


图6 储能系统容量变化对新能源消纳率的影响

Fig. 6 The impact of energy storage system capacity changes on renewable energy consumption rate

能系统装机容量的增加而降低，成本的降低幅度从5%提高至14.4%。同时，新能源发电装机容量越小，曲线斜率越大，储能容量增加带来的成本降低就越明显。而且，储能容量增加对成本的降低效应是边际递减的，即随着储能容量的增加成本降低的

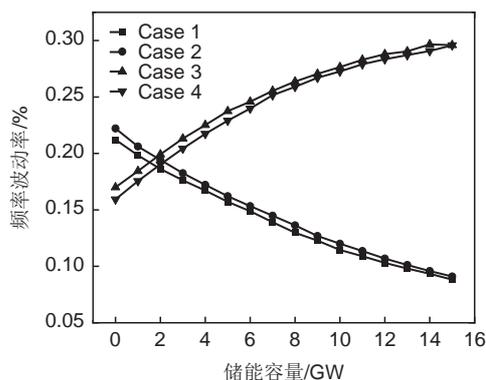


图7 储能系统容量变化对电力系统频率波动的影响

Fig. 7 The impact of energy storage system capacity changes on power system frequency fluctuations

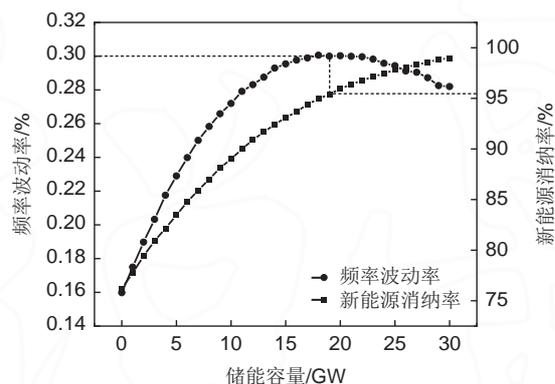


图8 储能系统容量变化时频率波动与新能源消纳率的关系

Fig. 8 Relationship between frequency fluctuation and renewable energy consumption rate when energy storage capacity changes

速度越来越慢。

由图5和图6可见, 储能容量的增加有利于提高新能源发电在总发电量中的占比以及新能源消纳率。对于新能源装机较少的情况(Case 1和Case 2), 由于火电已经能够较好地承担调频调峰任务, 因此储能系统对新能源发电占比和消纳率的提高并不明显, 当储能容量达到5 GW时, 已经实现了新能源100%消纳。而在新能源装机较多的情况(Case 3和Case 4)下, 储能容量从0 GW增加至15 GW可以使得新能源发电占比和新能源消纳率提高约22%。由此可见, 在电网各组分的容量配置中必须将新能源装机容量与储能容量协调考虑。

由图7可见, 随着储能系统容量的增加, Case 1和Case 2的电网频率波动率逐渐下降, 显然这得益于储能系统的快速响应能力提高了电网的调峰调频能力。但是在Case 3和Case 4中, 电网频率波

动情况反而随着储能容量的增加而扩大了。为了分析这一反常规律的原因, 将储能容量的分析范围从0~15 GW拓展至0~30 GW, 并得到了图8所示的频率波动率与新能源消纳率的关系。发现当新能源装机容量较高时, 储能容量的提高主要作用于提高新能源消纳率, 也因此带来了频率波动率的提高。当新能源消纳率达到95%以后, 频率波动率才会随着储能容量的增加而降低。

### 2.3 新能源装机容量对电网性能的影响

随着“双碳”目标的持续推进, 风电和光伏装机量将持续保持高增长, 因此研究新能源发电装机容量的增长对电网性能的影响至关重要。表4为研究新能源发电装机容量变化时设定的4个场景。

表4 4种研究场景的参数设计

Table 4 Parameter design of 4 research scenarios

参数	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
火电装机容量/GW	111	111	100	100
储能装机容量/GW	5	15	10	20

图9~图12为当新能源发电装机容量从表1所示数值增长到翻倍时, 电力系统性能参数的变化情况。

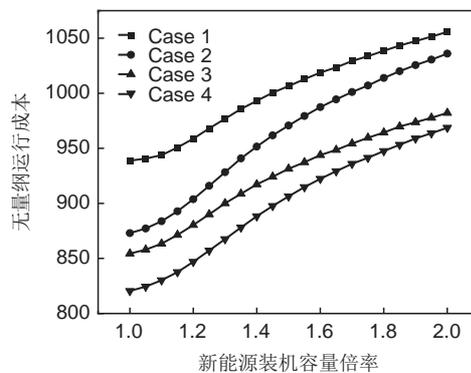


图9 新能源装机容量对电力系统运行成本的影响

Fig. 9 The impact of renewable energy installed capacity on power system operating cost

由图9可见, 随着新能源装机容量的增加, 4种情况下电网的运行成本均不断上升, 上升幅度为12.5%~18.7%。这一方面是因为新能源发电成本偏高, 另一方面是为了消纳新能源发电需要付出更高的调峰调频成本。Case 2的成本比Case 1低, Case 4的成本比Case 3低, 从另一个侧面证明了配备容量更大的储能系统可以有效降低发电成本。Case 3和Case 4比Case 1和Case 2更低,

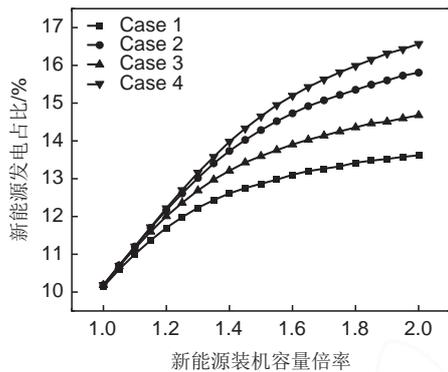


图10 新能源装机容量对新能源发电占比的影响  
Fig. 10 The impact of renewable energy installed capacity on the proportion of renewable energy power generation

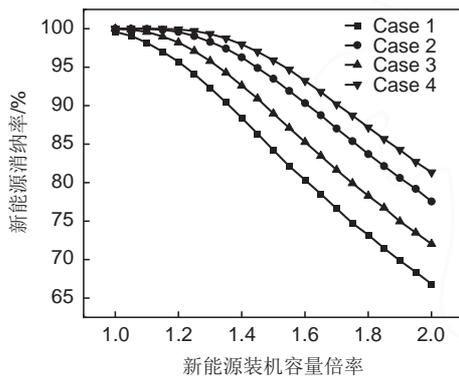


图11 新能源装机容量对新能源消纳率的影响  
Fig. 11 The impact of renewable energy installed capacity on renewable energy consumption rate

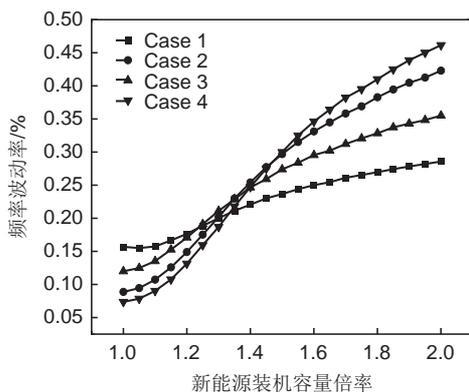


图12 新能源装机容量对频率波动率的影响  
Fig. 12 The impact of renewable energy installed capacity on frequency fluctuation rate

说明降低火电机组的装机容量可以降低发电成本。

由图10可见，新能源装机容量的增加可以有效提高新能源发电在总发电量中的占比，同时4条曲线从上至下储能系统容量逐次降低。这说明火电

机组容量较低或者储能系统容量较高的情况下，新能源发电的占比会更高，并且储能系统容量的影响更为显著和重要。

由图11可见，随着新能源装机量的增加，新能源消纳率降低了18.7%~32.9%。与图10类似，4条曲线从上至下储能系统容量依次降低，说明提高储能系统容量对提高新能源消纳率更为重要。

由图12可见，在新能源装机容量较低的情况下，更高的储能容量可以有效降低电力系统的频率波动率；而当新能源装机容量较高时，更高的储能容量会伴随着更大的频率波动率。这一规律与图7和图8的分布规律具有相同原因。

### 3 结 论

本工作建立了包含风光火储在内的电力系统调度模型，应用蒙特卡洛方法，在充分考虑风电、光伏和用户侧负荷不确定性的前提下，分析了新能源装机容量和储能系统容量增加将会对电网的发电成本、新能源发电占比、新能源消纳率和频率波动率的影响。得到如下结论：

(1) 应尽可能提高电网中储能系统装机容量，可以有效降低运行成本，提高新能源消纳率。当储能容量从0 GW提高到15 GW时，运行成本最高降低了14.4%，新能源消纳率和新能源发电占比最高提高约22%。

(2) 储能系统的容量配备还应根据目的的不同，考虑当前电网的新能源消纳率的影响。当新能源消纳率低于95%时，储能系统容量的提高将主要作用于提高消纳率，导致波动率的提高；而当消纳率高于95%时，储能容量的提升可以有效提高电网稳定性。

(3) 提高新能源装机容量是提高电力系统新能源发电占比最直接有效的方式。当新能源装机容量翻倍时，新能源发电占比提高了62.6%，但是会导致发电成本上升18.7%，电网波动放大约6倍。

(4) 对于提高新能源消纳，提高电网稳定性而言，储能系统在成本和性能上均优于火电机组，即可以通过提高储能系统装机容量来替代部分火电机组，提高系统整体稳定性和经济效益。

### 参 考 文 献

[1] 孙翠清. 储能技术在新能源电力系统的应用研究[J]. 电子世界,

- 2022(1): 27-28.  
SUN C Q. Research on application of energy storage technology in new energy power system[J]. *Electronics World*, 2022(1): 27-28.
- [2] 国家发展和改革委员会能源研究所可再生能源发展中心. 国际可再生能源发展报告—2019[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.  
National Development and Reform Commission Energy Research Institute Renewable Energy Development Center. *International renewable energy development report*[M]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2019.
- [3] 中国科学院创新发展研究中心, 中国先进能源技术预见研究组. 中国先进能源2035技术预见[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
Innovation and Development Research Center, Chinese Academy of Sciences, China Advanced Energy Technology Foresight Research Group. *China advanced energy 2035 technology foresight*[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [4] 张晋华, 朱悦榕, 李旭强, 等. 考虑风电不确定性的含海上风电场电力系统优化调度策略研究[J]. *分布式能源*, 2021, 6(5): 33-43.  
ZHANG J H, ZHU Y R, LI X Q, et al. Optimization scheduling strategy of offshore wind farm power system considering wind power uncertainty[J]. *Distributed Energy*, 2021, 6(5): 33-43.
- [5] 贺强, 晁海亮, 闫明, 等. 考虑风光不确定性的电力系统概率潮流计算[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(6): 113-119, 126.  
HE Q, CHAO H L, YAN M, et al. Probabilistic power flow calculation of the power system considering wind power and photovoltaic uncertainties[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(6): 113-119, 126.
- [6] 潘晓杰, 张文朝, 徐友平, 等. 考虑多源负荷不确定性的电力系统安稳风险优化[J]. *可再生能源*, 2022, 40(3): 396-401.  
PAN X J, ZHANG W C, XU Y P, et al. The stability risk optimization for power system considering multi-source load uncertainty[J]. *Renewable Energy Resources*, 2022, 40(3): 396-401.
- [7] 李峰, 高效海, 郑鹏飞, 等. 基于高斯过程回归与不确定性耦合关系的电力系统规划典型场景提取技术[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(1): 64-73.  
LI F, GAO X H, ZHENG P F, et al. Extraction of typical scenarios for power system planning based on Gaussian process regression and uncertainty coupling relationship[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(1): 64-73.
- [8] 崔杨, 周慧娟, 仲悟之, 等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(11): 85-93.  
CUI Y, ZHOU H J, ZHONG W Z, et al. Low-carbon scheduling of power system with wind power considering uncertainty of both source and load sides[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(11): 85-93.
- [9] 宋晓芳, 周海强, 薛峰, 等. 计及源荷不确定性及频率安全的电力系统区间优化调度方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(7): 212-220.  
SONG X F, ZHOU H Q, XUE F, et al. Interval optimal dispatching method of power system considering source-load uncertainty and frequency security[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(7): 212-220.
- [10] 陈海东, 王鑫, 王勇, 等. 考虑源荷两侧不确定性及其相互影响的配电网低电压综合治理规划[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2021, 42(6): 173-183.  
CHEN H D, WANG X, WANG Y, et al. Comprehensive control plan for voltage drop of distribution network considering uncertainties on both sides of source and load and their mutual influence[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2021, 42(6): 173-183.
- [11] 余东, 严正, 王晗, 等. 基于含时序项代理模型的电力系统时域仿真不确定性分析[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(20): 119-128.  
SHE D, YAN Z, WANG H, et al. Uncertainty analysis of time-domain simulation for power system based on surrogate model containing time series terms[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(20): 119-128.
- [12] 陟晶, 张高航, 邵冲, 等. 含大规模风电及光热电站的电力系统优化调度方法[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(1): 79-85.  
ZHI J, ZHANG G H, SHAO C, et al. Optimal dispatching method for power system with large scale wind power and concentrated solar power plant[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(1): 79-85.
- [13] 郭琛良, 张德虎, 许昌, 等. 配合风电消纳的综合储能系统经济容量优化研究[J]. *可再生能源*, 2022, 40(5): 660-666.  
GUO C L, ZHANG D H, XU C, et al. Study on economic capacity optimization of comprehensive energy storage system combined with wind power consumption[J]. *Renewable Energy Resources*, 2022, 40(5): 660-666.
- [14] 陈晓光, 杨秀媛, 卜思齐, 等. 考虑经济功能性的风电场储能系统容量配置[J]. *发电技术*, 2022, 43(2): 341-352.  
CHEN X G, YANG X Y, BU S Q, et al. Capacity allocation of wind farm energy storage system considering economic function[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(2): 341-352.
- [15] 余全全, 谢丽蓉. 风电并网多目标混合储能系统优化配置[J]. *现代电子技术*, 2021, 44(22): 111-115.  
YU Q Q, XIE L R. Optimal configuration of multi-objective hybrid energy storage system for wind power grid-connection[J]. *Modern Electronics Technique*, 2021, 44(22): 111-115.
- [16] 杨晓雷, 丁磊明, 李逸鸿, 等. 计及风电不确定性的混合储能系统优化配置研究[J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(6): 69-74.  
YANG X L, DING L M, LI Y H, et al. Study on optimal allocation of hybrid energy storage system considering wind power uncertainty[J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(6): 69-74.
- [17] 杨文强, 常彬. 计及多影响因素的发电侧混合储能系统容量配置方法及配置工具[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(10): 3246-3256.  
YANG W Q, CHANG B. Research on the configuration method & tool for the hybrid energy storage system on the power generation side[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(10): 3246-3256.
- [18] 张昊. 提高配电网新能源消纳比例的分分布式储能系统优化配置方法[J]. *电气应用*, 2022, 41(3): 56-63.  
ZHANG H. Optimized configuration method of distributed energy storage for improving renewable energy accommodation in distribution network[J]. *Electrotechnical Application*, 2022, 41(3): 56-63.
- [19] 张雪菲, 孙阔, 张章, 等. 考虑源荷不确定性与碳减排的复合储能系

- 统优化配置模型[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 42-49.  
ZHANG X F, SUN K, ZHANG Z, et al. An optimal configuration model of composite energy storage system considering source-load uncertainty and carbon emission reduction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 42-49.
- [20] 唐雨薇. 分布式化学储能系统数据分析模型构建研究[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 737-738.  
TANG Y W. Research on data analysis model construction of distributed chemical energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 737-738.
- [21] 丁志勇. 风电场短期功率预测方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
DING Z Y. Study of short-term prediction of wind power[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [22] 刘昊, 柳亦兵, 辛卫东, 等. 基于运行数据的风力发电机组功率特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(7): 53-56.  
LIU H, LIU Y B, XIN W D, et al. Wind turbine power performance based on the operation data[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(7): 53-56.
- [23] 王航臣, 曹宇露, 赵迪. 一种基于蒙特卡洛模拟的航空公司机票超售数量确定方法[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(2): 130-136.  
WANG H C, CAO Y L, ZHAO D. A method to determine the overbooking quantity of airline tickets based on Monte Carlo simulation[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2021(2): 130-136.
- [24] 荆涛, 田锡天. 基于蒙特卡洛-自适应差分进化算法的飞机容差分配多目标优化方法[J]. 航空学报, 2022, 43(3): 577-588.  
JING T, TIAN X T. Multi-objective optimization method for aircraft tolerance allocation based on Monte Carlo-adaptive differential evolution algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(3): 577-588.
- [25] 殷勤, 缪继东, 张晓明, 等. 基于马尔科夫链蒙特卡洛的台区可靠性评估方法[J]. 电工电气, 2021(5): 7-11.  
YIN Q, MIAO J D, ZHANG X M, et al. A method for evaluating the reliability of transformer area based on Markov chain Monte Carlo[J]. Electrotechnics Electric, 2021(5): 7-11.
- [26] 曹瑞, 刘燕斌, 陆宇平. 基于马尔科夫蒙特卡洛法的系统辨识方法研究及应用[J]. 宇航学报, 2022, 43(4): 423-433.  
CAO R, LIU Y B, LU Y P. Research and application of system identification method based on Markov chain Monte Carlo method[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(4): 423-433.
- [27] 刘晓静. 基于蒙特卡洛方法的可靠性灵敏度分析[J]. 机械管理开发, 2021, 36(11): 53-55.  
LIU X J. Reliability sensitivity analysis based on Monte Carlo method[J]. Mechanical Management and Development, 2021, 36(11): 53-55.
- [28] 席英杰, 张崇兴, 董明, 等. 基于蒙特卡洛模拟的声电联合局部放电定位阵列设计及快速定位方法研究[J/OL]. 电网技术. [2022-12-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20220701.1328.003.html>.

