

# 考虑调峰调频双重约束的储能规划方法研究

陈雷<sup>✉</sup>, 文婷

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的] 在新型电力系统的构建进程中, 新能源将保持高速发展态势。风、光等新能源大规模并网, 其出力的随机性和波动性将给电力系统安全经济运行带来挑战。新型储能由于其具备快速的响应能力和削峰填谷的功效, 再加上成本的逐步下降, 未来将是电力系统不可或缺灵活调节资源。[方法] 储能容量规划是电力系统全局性问题, 通过分析新能源消纳率和调频充裕度, 从系统调峰和调频两个方面, 以系统总成本最低为目标提出了省级电网储能规模分析方法。[结果] 文章以省级电网实际参数为例, 采用时序生产模拟软件分析了电源开机方式, 对比了不同储能规模对全社会经济性的影响。[结论] 结果表明, 合适的储能规模可在提高新能源消纳的同时降低全社会成本, 该方法的有效性得到了验证, 可为实际应用提供指导。

**关键词:** 新能源; 新型储能; 规划; 调峰调频; 经济性

中图分类号: TK02; TK11

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)02-0062-09

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on Energy Storage Planning Method Considering the Dual Constraints of Peak Shaving and Frequency Modulation

CHEN Lei<sup>✉</sup>, WEN Ting

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] In the process of building a new power system, renewable energy will maintain a high-speed development trend. Along with large-scale grid connection of renewable energy sources such as wind energy and photovoltaic energy, the randomness and fluctuation of its output will bring challenges to the safe and economical operation of the power system. The new energy storage system will become an indispensable resource subject to flexible regulation for the power system in the future due to its fast response ability and the effect of cutting peak and filling valley as well as the gradual reduction of its cost. [Method] The energy storage capacity planning was a global problem of the power system. By analyzing the renewable energy consumption rate and frequency modulation adequacy, a provincial power grid energy storage scale analysis method was proposed from the perspectives of peak shaving and frequency modulation based on the target of the lowest total cost of the system. [Result] Taking the actual parameters of the provincial power grid as an example, the time series production simulation software has been used to analyze the power startup mode, and the impacts of different energy storage scales on the economical efficiency of the whole society have been compared. [Conclusion] It shows that the consumption of renewable energy can be improved and the cost of the whole society can be reduced by adopting the appropriate scale of energy storage. The effectiveness of the method has been verified. Therefore, this work can provide some guidance for practical application.

**Key words:** renewable energy; new energy storage; planning; peak shaving and frequency modulation; economical efficiency

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-08-24 修回日期: 2022-10-24

基金项目: 中国能建广东院科技项目“新型电力系统下氢能与储能关键技术研究”(EV10071W)

## 0 引言

为贯彻落实国家碳达峰、碳中和战略目标,构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统,我国能源系统的低碳化转型将进一步加快,预计“十四五”及以后,中国新能源仍将保持高速发展态势。

截至2021年底,我国风、光新能源装机规模达635 GW,占全国发电装机容量的26.7%<sup>[1]</sup>。根据相关研究<sup>[2]</sup>，“十四五”期间,中国的新能源装机占比将提升到35%左右,到2050年将达到近70%。新能源发电具有随机性、波动性、间歇性等特点,且相较于同步发电机,不具有阻尼特性。风光等新能源大规模并网,将给新能源消纳和电力供应的可靠性带来极大挑战。储能作为一种优质的灵活资源,可有效快速响应,实现电力系统发电和用电的解耦,提升新能源并网友好性,提高新能源消纳水平,是实现新能源发展的关键支撑<sup>[3]</sup>。

近年来,国内外学者对储能规模的研究主要集中于新能源场站侧:如平滑新能源出力的短期波动性的储能容量优化配置<sup>[4-6]</sup>、弥补新能源出力的预测偏差<sup>[7-9]</sup>及提高新能源一次调频能力<sup>[10-12]</sup>。当前部分研究仅从场站侧基于新能源出力特性,而不与系统的负荷、电源结构及系统总成本相结合进行中长期的储能容量优化确定储能总体规模<sup>[13-15]</sup>是缺乏全面性的,且会造成储能容量冗余。新能源出力波动和预测偏差属于调峰问题,在调峰问题方面,大规模新能源接入电网的调峰需求,与并网系统的负荷特性、电源结构以及新能源出力特性密切相关。在调频方面,新能源大规模接入减少了常规电源的开机容量,从而降低了系统的调频能力<sup>[16-17]</sup>。电力系统储能的需求与电源结构及开机容量密切相关。因此,为适应未来大规模新能源发展,有必要从系统角度,综合考虑调峰、调频及全社会经济性,提出储能规划的合理规模。

本文综合储能技术路线选择、储能调峰、调频容量优化、全社会经济效益4个方面,系统性提出了适用于规模化新能源并网的储能容量规划分析方法,可为省级新型储能发展规划提供思路。

## 1 储能技术路线选择

### 1.1 储能技术路线对比分析

目前已有的储能形式主要可分为电化学储能、

物理储能和电磁储能。电化学储能主要包括铅炭电池、锂离子电池、液流电池等;物理储能主要包括抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等;电磁储能主要包括超导储能、超级电容器储能等<sup>[18]</sup>。

从储存能量的时间尺度和为电力系统提供支撑的功能来看,主要分为功率型储能和能量型储能。功率型储能特点是比功率高,能够大电流放电,不过能量密度不高,主要用于瞬间高功率输入、输出场合,一般为中短期储能,放电时间为秒级到分钟级,典型的如飞轮储能、超导储能和超级电容储能,适用于电力系统调频、电压突降、提高用户电能质量等;能量型储能特点是比能量高,适合小电流长时间放电,功率密度不高,主要用于高能量输入、输出场合,一般为中长期储能,放电时间达到小时至日级别,典型的如抽水蓄能、锂离子电池、铅炭电池等,比较适合于系统调峰,也可兼顾调频<sup>[13]</sup>。表1给出了各种主要储能技术的特性比较。

### 1.2 电化学储能选型

抽水蓄能一般初始投资较大,建设周期长,对场址要求高;压缩空气储能成本较高,效率较低;电化学储能布局灵活,建设周期短,且近年来发展较快。截至2021年底,国内电化学储能累计投产规模占新型储能的88%。因此,本文讨论的储能主要以电化学储能电池为主。当前主流的电化学储能电池有磷酸铁锂、铅炭电池、全钒液流电池等。各类电池的特性如表2所示。

铅炭电池在度电成本以及运行温度方面均具有较大的优势。其缺点是充放电倍率低,属于能量型储能元件,适用于能量要求大功率要求低的应用场合。

磷酸铁锂电池在充放电倍率、单位造价、循环寿命、占地、运行温度等各方面都有较好的表现,且技术成熟、降价趋势明显,是目前国内工程上应用最多的电化学储能类型。

全钒液流电池循环寿命长,全寿命周期度电成本较低。其缺点是占地大,初次投资费用高,且工作温度需要严格控制在5~45℃,低温时低价钒由于溶解度降低析出晶体,高温时五价钒易分解V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>沉淀,导致使用寿命下降<sup>[19-20]</sup>。

综上所述,磷酸铁锂电池技术成熟、综合技术经济指标较好且降价趋势明显,可适用于大规模新能源并网的系统级调峰、调频,因此,选取磷酸铁锂电池进行分析。

表 1 各类型储能主要特性

Tab. 1 Main characteristics of each type of energy storage

储能类型	能量密度/ [Wh·(kg) <sup>-1</sup> ]或 (Wh·L <sup>-1</sup> )	功率密度/ [W·(kg) <sup>-1</sup> ]或 (W·L <sup>-1</sup> )	典型放 电时间	响应 时间	特点
电化学储能					
铅炭电池	50~80	150~500	0.25~10 h	毫秒级	技术成熟,成本低;循环寿命短;
磷酸铁锂	120~180	1 500~2 500	0.3~6 h	毫秒级	能量密度较高,成本较低;效率较高,运行安全问题有待改进
钛酸锂	60~80	3 000	1~5 h	毫秒级	能量密度较低,成本较高;效率较高,安全性高
液流电池	12~40	50~100	4~10 h	百毫秒级	能量密度较低,成本较高;效率较低,安全性高
物理储能					
抽水蓄能	0.5~2	0.1~3	4~25 h	分钟级	技术成熟,响应相对较慢,受地理资源限制
压缩空气储能	3~6	0.5~2	1~20 h	毫秒级	容量大、充放电次数多、寿命长、效率相对较低
飞轮储能	20~80	4 500	15 s~15 min	分钟级	功率密度高、寿命长、环境友好、响应速度快、能量密度低、自放电率高
电磁储能					
超导储能	1.1	5 000	2 s~5 min	毫秒级	效率高、响应快、安全性好,成本高、维护复杂
超级电容	1.5~2.5	1 000~10 000	1~30 s	毫秒级	效率高、响应快、安全性好,成本高

表 2 当前主流储能电池的特性参数表

Tab. 2 Characteristic parameters of current mainstream energy storage battery

电池类型	充放电倍率/C	单位造价/[元·(kWh) <sup>-1</sup> ]	循环寿命/次	度电成本/[元·(kWh) <sup>-1</sup> ]	百兆瓦占地面积/m <sup>2</sup>	运行温度/℃
铅炭	0.2	800~1 300	2 000~3 000(60%DOD)	0.4~0.6	15 000	-40~50
磷酸铁锂	0.5~2	1 400~2 200	5 000~6 000(80%DOD)	0.5~0.6	10 500	-20~55
全钒液流	0.25	1 600~2 400	5 000~10 000(90%DOD)	0.39~0.58	20 000	5~45

## 2 储能规模分析方法

### 2.1 优化目标

调峰和调频是系统性问题,与电力系统的灵活性资源总体规模、电源结构与出力特性、负荷特性密切相关,不同电力系统会有较大的差别。储能规模分析方法,是在保证系统电力电量平衡的基础上,按各火机组的负载优先序位确定各火电站的最佳开机容量和在系统负荷曲线上的最佳工作位置,使得系统总发电成本最小。

#### 2.1.1 调峰

从系统调峰平衡和新能源消纳的角度,储能规模的优化目标是在满足新能源消纳率约束的前提下,系统年费用最低。可表示如下:

$$(P_{\text{BESS}}, S_{\text{BESS}}) = \min \{A_{\text{SYS}} | Q_{\text{ren}} \leq Q\} \quad (1)$$

式中:

$P_{\text{BESS}}$  ——储能功率(MW);

$S_{\text{BESS}}$  ——储能容量(MWh);

$A_{\text{SYS}}$  ——增加储能规模后系统的年费用(百万元),包括储能投资年化(百万元)和系统年运行费用(百万元);

$Q_{\text{ren}}$  ——新能源实际弃电率(%);

$Q$  ——新能源弃电率约束(%).

#### 2.1.2 调频

从系统调频角度,分析储能的配置规模。储能配置的优化目标是在满足系统一、二次调频备用需求的前提下,储能的最小配置规模。为了定量分析调频能力是否满足调频备用需求,定义充裕度如下:

$$\begin{aligned} R_1 &= (M_1/N_1 - 1) \times 100\% \\ R_2 &= (M_2/N_2 - 1) \times 100\% \end{aligned} \quad (2)$$

若  $R_1 < 0$  或  $R_2 < 0$ , 则表示需要分别增加储能规模  $P_{\text{BESS}}^1$ 、 $P_{\text{BESS}}^2$  来满足系统调频备用需求。

式中:

$R_1$  ——系统的一次调频充裕度(%);

$R_2$  ——系统的二次调频充裕度(%);

$M_1$  ——系统的一次调频能力(GW);

- $M_2$  ——系统的二次调频能力(GW);
- $N_1$  ——系统的一次调频备用需求(GW);
- $N_2$  ——系统的二次调频备用需求(GW);
- $P_{BESS}^1$  ——系统的一次储能功率需求(GW);
- $P_{BESS}^2$  ——系统的二次储能功率需求(GW)。

### 2.1.3 综合分析

由于磷酸铁锂电池性能可满足系统调峰、调频需求,且储能用于调峰主要发挥能量效应,用于调频主要发挥功率效应,对剩余电量的影响不大,因此,为发挥储能的综合作用,可选取调峰储能需求和调频储能需求较大值作为优化的储能规模。

### 2.2 约束条件

1) 电力系统运行的常规约束条件: 包括各时段系统电力平衡约束、电量平衡约束、调峰平衡约束等。

2) 常规电厂单机运行约束: 包括发电机组运行上下限约束、最小升荷时间约束和最大的爬坡率约束、排放约束、燃料消耗约束等。

3) 储能设备运行约束: 包括储能最大充放电功率、最大充放电时间、储能容量、循环寿命、能量转换效率等。

4) 新能源运行约束: 包括出力特性约束、检修约束等。

### 2.3 优化思路

根据上述优化目标和约束条件,整体优化思路如图 1 所示,具体包括:

1) 针对不考虑储能的电力系统开展电力、电量及调峰平衡分析,同时计算系统新能源弃电率及年费用  $A$ ,若弃风率不满足约束要求,则增加储能规模使弃电率满足约束要求。

2) 输出储能配置规模  $P_{BESS}$ 、 $S_{BESS}$  弃电率  $Q_{ren}$  及系统年费用  $A_{SYS}$ 。

3) 继续增加储能配置规模,若系统年费用  $> A_{SYS}$ ,则输出储能规模  $P_{BESS}$ 、 $S_{BESS}$ 。

4) 在 3) 的基础上,输出系统年费用  $< A_{SYS}$  的调峰储能配置规模。

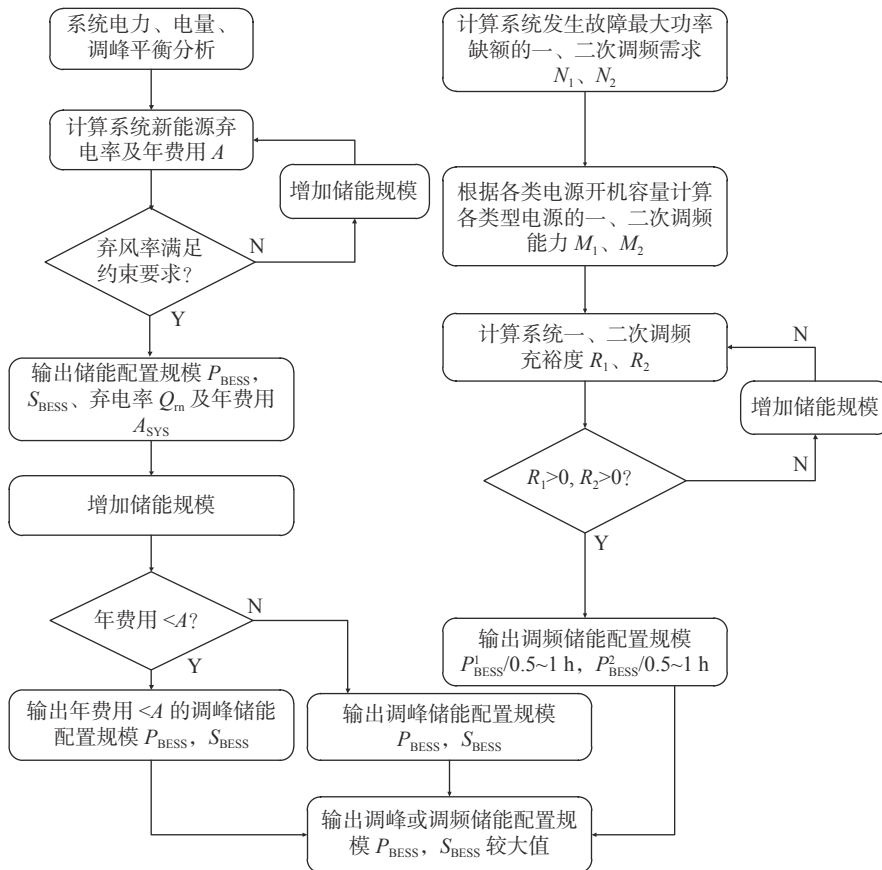


图 1 储能容量优化配置流程图

Fig. 1 Flow chart of optimal allocation of energy storage capacity

5) 计算系统发生故障, 最大功率缺额的一、二次调频需求  $N_1$ 、 $N_2$ 。

6) 根据各类电源开机容量计算各类型电源的一、二次调频能力  $M_1$ 、 $M_2$ 。

7) 计算系统一、二次调频充裕度  $R_1$ 、 $R_2$ 。

8) 若  $R_1$ 、 $R_2 < 0$ , 则增加储能规模  $P_{\text{BESS}}^1$ 、 $P_{\text{BESS}}^2$ , 时间可取 (0.5~1 h), 直至使  $R_1$ 、 $R_2$  均  $> 0$ 。

9) 系统储能规划容量 =  $\max[\text{调峰储能规模}(P_{\text{BESS}}、S_{\text{BESS}}), \text{调频储能规模}(P_{\text{BESS}}^1 + P_{\text{BESS}}^2) / (0.5 \sim 1 \text{ h})]$ 。

### 3 储能规模分析

#### 3.1 调峰角度储能规模分析

根据某省“十四五”能源发展规划, 至 2025 年, 该省全社会最大用电负荷和全社会用电量分别为 180 GW、880 TW, 电源装机结构如表 3 所示。此外, 还有外来电力 45.08 GW。各类电源及外电的调节能力如表 4 所示。

表 3 2025 年某省电源装机结构

Tab. 3 Installation structure of power supply in a province in 2025

装机类型	装机容量/GW	装机占比/%
核电	18.54	8
水电	9.26	4
抽蓄	9.68	4
煤电	64.38	34
气电	735.03	26
风电	26.00	11
光伏	28.00	11
生物质及其他	4.80	2

表 4 某省电源调节能力

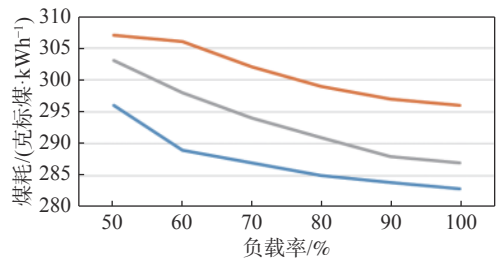
Tab. 4 Power regulation capability of a province

电源类型	最小技术出力/%
煤电	40~60
调峰气电	0
热电联产	50
核电	100
风电	29
光伏	0
生物质	80
抽蓄	-110
西电	15

基本场景下, 磷酸铁锂电池的单位投资按 2 000 元/kW 考虑。考虑到储能的单位投资呈不断下降的趋势, 将对系统经济性产生影响, 因此增加考虑储能单位投资降低 20% 的场景。

基于以上边界, 在充分利用常规电源的调节能力的前提下, 分析全省储能配置规模。从负荷特性、新能源出力特性和外来电特性 3 个维度, 采用典型负荷/出力/送电曲线的方式进行时序模拟分析。

根据电力系统运行方式, 储能通过在负荷低谷期储能充电, 使新能源弃电量减少, 在提高系统新能源消纳水平的同时减小火电调峰深度; 储能在负荷高峰期放电, 从而代替部分火电的开机, 使火电开机容量下降, 火电的发电量下降。根据图 2, 火电机组的发电能耗随着负载率的降低而升高, 同时由于储能的替代作用火电的发电量下降, 若火电可变成本的降低大于储能的投资, 即增加的储能规模可降低系统年费用, 具有全社会经济效益。



注: — 百万机组; — 六十万机组; — 三十万机组。

图 2 火电机组的发电能耗

Fig. 2 Power generation energy consumption of thermal power unit

考虑以 0 储能方案作为基本场景, 测算新增 100 万/1~2 h 储能、200 万/1~2 h 储能、300 万/1~2 h 储能、400 万/1~2 h 储能的新能源弃电率及系统年费用。

根据图 3 可以看出, 若约束新能源弃电率为 2%, 系统不配置储能, 新能源弃电率 0.46%, 满足新能源弃电约束要求。考虑储能具有开机替代及降碳作用, 合理的储能规模可进一步降低系统年费用。增加储能规模, 可降低新能源弃电率, 系统年费用总体呈先下降再上升的趋势, 且相同功率储能续航时间 1 h 的年费用比 2 h 低。从全社会经济效益来看, 配置 1~3 GW/1 h 储能均具有经济性, 其中配置 2 GW/1 h 储能经济性最好。新能源弃电率由 0.46% 降至 0.34%。



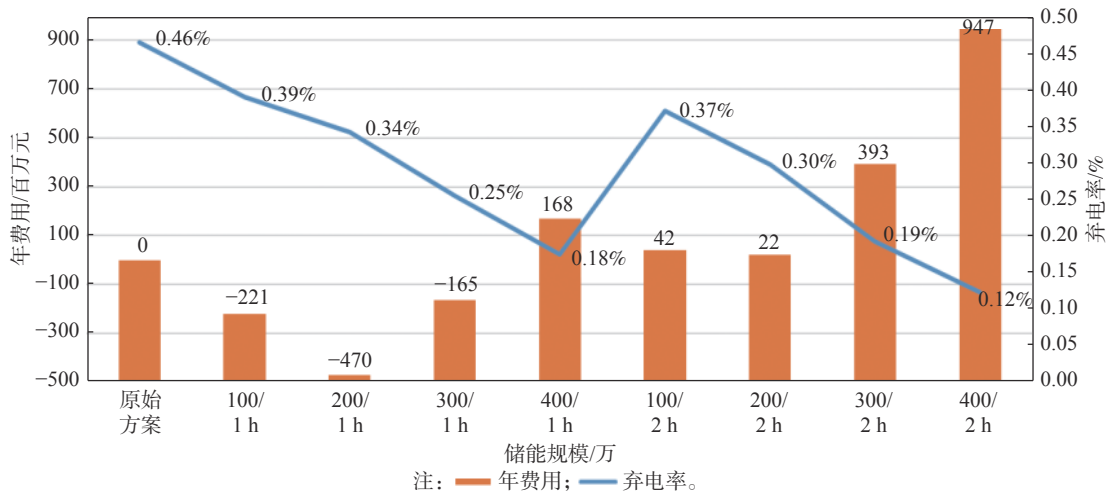


图 3 不同储能规模技术经济比较

Fig. 3 Technical and economic comparison of different energy storage scales

考虑储能单位投资降低 20%, 对新增 1~4 GW/1~2 h 储能进行经济比较, 如图 4 所示。储能价格变化, 不会改变电源开机容量及结构, 相比基本场景, 新能源弃电率不变。相同储能规模, 火电的年可变费用不变, 经济性仅受储能年费用影响。可以看出, 储能单位投资降低 20% 场景下, 配置 1~4 GW/1 h、1~2 GW/2 h 储能均具有经济性, 其中配置 2 GW/2 h 储能经济性最好。

以配置 2 GW/1 h 储能为例进行分析。图 5 展示了增加储能前后电站工作位置图。可以看出, 不配置储能, 夜间 2~7 点均有弃风, 最大弃风时刻发生在 6 点, 弃风 7.41 GW; 配置 2 GW/1 h 储能, 储能

在调峰困难的低谷时段充电, 夜间 5~7 点仍有弃风, 最大弃风时刻仍发生在 6 点, 弃风减小至 4.71 GW。储能负荷高峰时刻放电, 使火电开机规模下降 2 GW, 开机替代率 100%。从全年发电量来看, 配置了储能后, 新能源消纳量提高了 130 GW 时, 煤电的发电量降低了 94 GW 时, 系统煤耗减少了 101.4 万 t, 二氧化碳排放量减少了 260 万 t。

因此, 从促进新能源消纳的调峰角度, 全省宜配置 2 GW/1 h 储能。

### 3.2 调频角度储能规模分析

2025 年某省所在的同步主网最大功率缺额故障为某直流双极闭锁, 主网最大功率缺额 8 GW, 根据

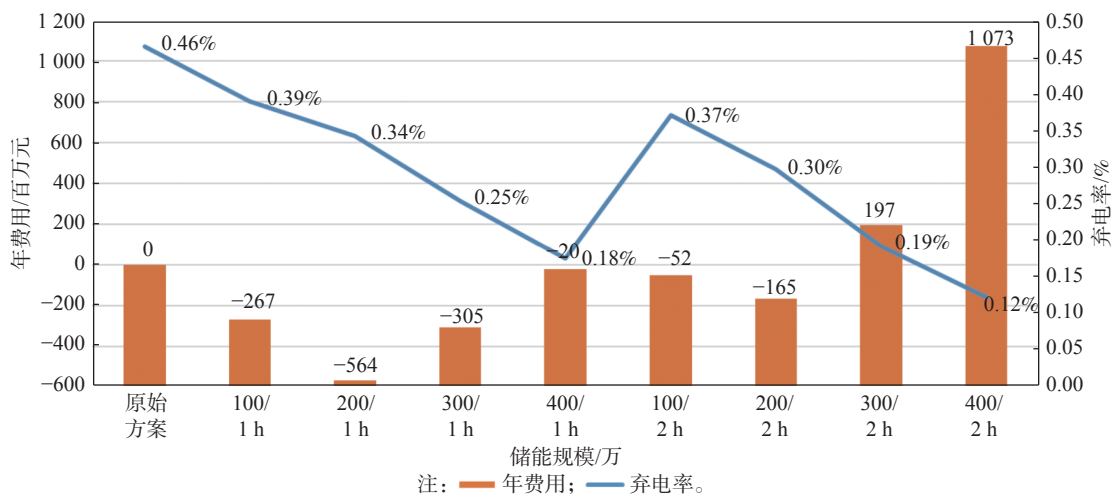


图 4 不同储能规模技术经济比较

Fig. 4 Comparison of energy storage price reduction scenarios

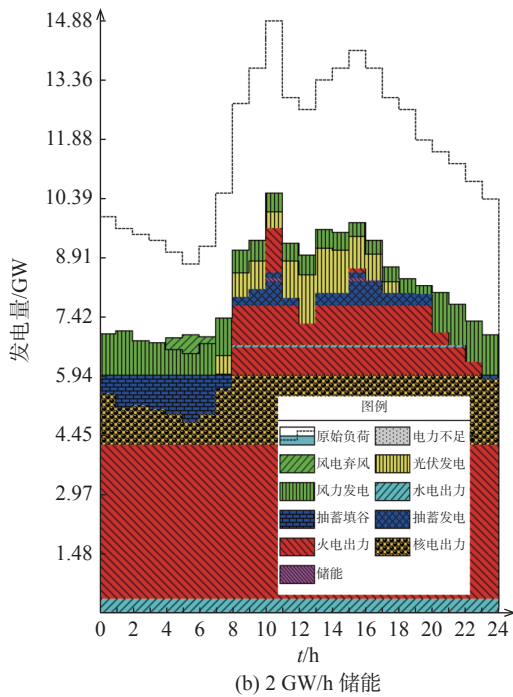
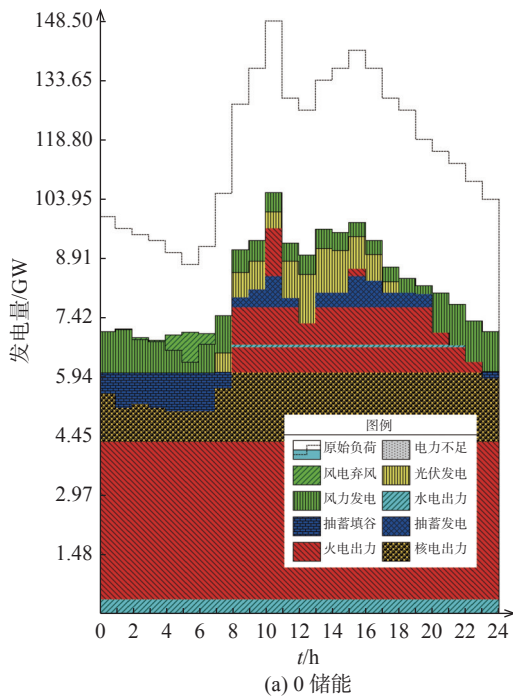


图 5 增加储能前后电站工作位置图

Fig. 5 Power station operation positions before and after increasing energy storage

该省电源装机容量占主网比例, 则该省一次调频最小需求约 2.6 GW, 二次调频最小需求约 2.7 GW。

电网预留的运行备用反映了电网的理想调频能力。以 HUST\_ProS 软件运行模拟的该省分月各类电源开机容量为基础, 对煤电、气电、水电及抽水蓄

能的调频能力进行分析, 核电、新能源场站暂按不纳入调频能力考虑。

2025 年分月一、二次调频备用如图 6 所示。由图可知, 该省煤电、气电装机占比较高, 2025 年月均一次调频备用在 4.56 ~ 7.56 GW 之间, 二次调频备用在 2.80 ~ 3.75 GW 之间。一、二次调频备用在迎峰度夏期间达全年之最, 进入 10 月份后呈下降趋势, 春节 2 月份期间达到最低, 全年整体呈现出“中间高两头低”的趋势。

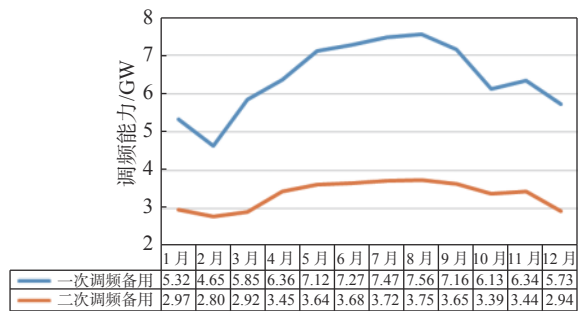


图 6 2025 年一、二次调频能力

Fig. 6 Primary and secondary frequency modulation capacities in 2025

根据公式(2)计算得到的某省的分月调频充裕度如图 7 所示。可见, 各月份一、二次调频充裕度均大于 0, 表示调频能力满足调频备用需求, 无需为调频额外配置储能容量。

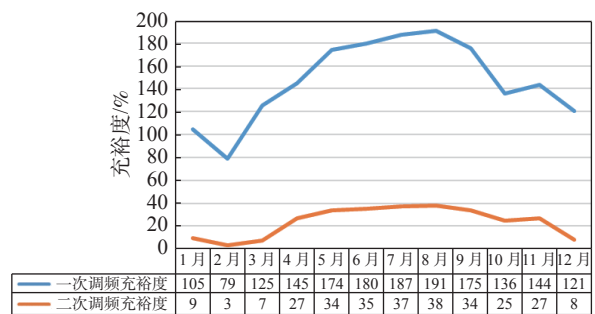


图 7 2025 年一、二次调频充裕度

Fig. 7 Adequacy of primary and secondary frequency modulations in 2025

考虑到储能快速、精确的响应能力, 能够在 1 s 之内完成电网调频调度指令, 调频效果是水电的 1.7 倍, 是天然气机组的 2.7 倍, 是火电机组的 30 倍。由于用于调频功能的储能续航时间相对较小, 可考虑由用于其他场景的储能兼顾其功能。

### 3.3 储能规模及功能定位

基于某省“十四五”能源发展规划推荐的电源方案,从调峰和调频两方面,以系统年费用最低为优化目标,推荐“十四五”期间规划储能规模为2 GW/2 GWh。

从时序运行模拟的储能工作位置来看,储能的功能定位为了解决新能源并网导致的系统调峰问题,同时还能兼顾系统高峰用电需求,优化电源运行方式,提高全社会经济效益,并兼顾调频,发挥储能的综合作用。

## 4 结论

本文从调峰、调频两个技术层面,结合全社会经济层面系统性提出了省级电网储能规模的分析方法。可为各省新型储能发展规划提供思路。主要结论如下:

1) 储能容量规划是系统性问题,本文从全系统出发,以系统年费用最低为目标提出了一种统筹调峰和调频两个维度的储能优化配置方法。

2) 本文以某省级电网为例,采用时序生产模拟分析了电源开机方式,通过不同储能规模对全社会经济性的影响,验证了合适的储能规模可在提高新能源消纳的同时降低全社会成本。

3) 通过时序运行模拟明确了储能工作位置,进一步分析了储能在系统中的功能定位,即为解决新能源并网导致的系统调峰问题,同时还能兼顾系统高峰用电需求,优化电源运行方式,提高全社会经济效益,并兼顾调频,发挥储能的综合作用。

### 参考文献:

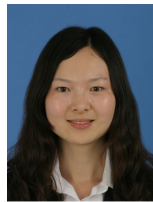
- [1] 国家能源局. 2021年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2022-01-26) [2022-08-22]. <http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c1310441589.htm>.  
National Energy Administration. National power industry statistics in 2021 [EB/OL]. (2022-01-26) [2022-08-22]. <http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c1310441589.htm>.
- [2] 杜忠明. “十四五”期间中国新能源装机占比将提升至35%左右 [N]. 中国改革报, 2021-8-24(6).  
DU Z M. China's installed capacity of new energy will increase to about 35% during the 14<sup>th</sup> Five-Year Plan period [N]. China Reform Daily, 2021-8-24(6).
- [3] 何可欣, 马速良, 马壮, 等. 储能技术发展态势及政策环境分析 [J]. 分布式能源, 2021, 6(6): 45-52. DOI: 10.16513/j.2096-2185.de.2106602.
- [4] HE K X, MA S L, MA Z, et al. Energy storage technology development trend and policy environment analysis [J]. *Distributed Energy*, 2021, 6(6): 45-52. DOI: 10.16513/j.2096-2185.de.2106602.
- [5] 李相俊, 马会萌, 姜倩. 新能源侧储能配置技术研究综述 [J]. 中国电力, 2022, 55(1): 13-25. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202109032.
- [6] LI X J, MA H M, JIANG Q. Review of energy storage configuration technology on renewable energy side [J]. *Electric Power*, 2022, 55(1): 13-25. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202109032.
- [7] 金鑫, 王凯. 平滑新能源波动的混合储能优化配置 [J]. 广东电力, 2021, 34(8): 80-85. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290x.2021.008.010.
- [8] JIN X, WANG K. Optimal allocation of hybrid energy storage to smooth fluctuation of new energy [J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 34(8): 80-85. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290x.2021.008.010.
- [9] LI X, HUI D, LAI X. Battery energy storage station(BESS)based smoothing control of photovoltaic(PV) and wind power eneration fluctuations [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(2): 464-473.
- [10] 郑浩, 谢丽蓉, 叶林, 等. 考虑光伏双平价指标的混合储能平滑出力波动策略 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1805-1817. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201058.
- [11] ZHEGN H, XIE L R, YE L, et al. Hybrid energy storage smoothing output fluctuation strategy considering photovoltaic dual evaluation indicators [J]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(9): 1805-1817. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201058.
- [12] 叶瑞丽, 郭志忠, 刘瑞叶, 等. 基于风电功率预测误差分析的风电场储能容量优化方法 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 28-34. DOI: 10.7500/aeps20130603009.
- [13] YE R L, GUO Z Z, LIU R Y, et al. A method for designing optimal energy storage system based on analysis of wind power forecast error [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(16): 28-34. DOI: 10.7500/aeps20130603009.
- [14] 石涛, 张斌, 晁勤, 等. 兼顾平抑风电波动和补偿预测误差的混合储能容量经济配比与优化控制 [J]. 电网技术, 2016, 40(2): 477-483. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.02.021.
- [15] SHI T, ZHANG B, CHAO Q, et al. Economic storage ratio and optimal control of hybrid energy capacity combining stabilized wind power fluctuations with compensated predictive errors [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(2): 477-483. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.02.021.
- [16] 杨丘帆, 王琛淇, 魏俊红, 等. 提升电网惯性与一次调频性能的储能容量配置方法 [J]. 电力建设, 2020, 41(10): 116-124. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2020.10.013.
- [17] YANG Q F, WANG S Q, WEI J H, et al. Capacity allocation of energy storage system for improving grid inertia and primary



- frequency regulation [J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(10): 116-124. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2020.10.013](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2020.10.013).
- [11] 孙培峰, 冯云岗, 卢海勇, 等. 新能源发电工程储能系统容量/功率优化配置 [J]. *上海节能*, 2021(1): 98-103. DOI: [10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2021.01.018](https://doi.org/10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2021.01.018).
- SUN P F, FENG Y G, LU H Y, et al. Capacity and power optimization method of energy storage device in new energy power generation project [J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2021(1): 98-103. DOI: [10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2021.01.018](https://doi.org/10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2021.01.018).
- [12] 张宝锋, 童博, 冯仰敏, 等. 电化学储能在新能源发电侧的应用分析 [J]. *热力发电*, 2020, 49(8): 13-18. DOI: [10.19666/j.rlfid.202004120](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202004120).
- ZHANG B F, TONG B, FENG Y M, et al. Application analysis of electrochemical energy storage technology in new energy power generation side [J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(8): 13-18. DOI: [10.19666/j.rlfid.202004120](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202004120).
- [13] 李德鑫, 王佳蕊, 张家郡. 降低弃光率的光伏储能系统需求研究 [J]. *电器与能效管理技术*, 2020(10): 36-40+63. DOI: [10.16628/j.cnki.2095-8188.2020.10.006](https://doi.org/10.16628/j.cnki.2095-8188.2020.10.006).
- LI D X, WANG J R, ZHANG J J. Research on demand of photovoltaic energy storage system for reducing abandonment rate [J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2020(10): 36-40+63. DOI: [10.16628/j.cnki.2095-8188.2020.10.006](https://doi.org/10.16628/j.cnki.2095-8188.2020.10.006).
- [14] 古宸嘉, 王建学, 李清涛, 等. 新能源集中并网下大规模集中式储能规划研究述评 [J]. *中国电力*, 2022, 55(1): 2-12+83. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202105017](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202105017).
- GU C J, WANG J X, LI Q T, et al. Review on large-scale centralized energy storage planning under centralized grid integration of renewable energy [J]. *Electric Power*, 2022, 55(1): 2-12+83. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202105017](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202105017).
- [15] 李红霞, 李建林, 米阳. 新能源侧储能优化配置技术研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(10): 3257-3267. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0102](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0102).
- LI H X, LI J L, MI Y. Summary of research on new energy side energy storage optimization configuration technology [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(10): 3257-3267. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0102](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0102).
- [16] 杨立滨, 曹阳, 魏桦, 等. 计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(16): 45-52. DOI: [10.7500/aeps20200224004](https://doi.org/10.7500/aeps20200224004).
- YANG L B, CAO Y, WEI W, et al. Configuration method of energy storage for wind farms considering wind power uncertainty and wind curtailment constraint [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(16): 45-52. DOI: [10.7500/aeps20200224004](https://doi.org/10.7500/aeps20200224004).
- [17] 唐坚, 苏剑涛, 姚禹歌, 等. 面向新型电力系统的风电调频技术分析 [J]. *热力发电*, 2022, 51(7): 1-8. DOI: [10.19666/j.rlfid.202202027](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202202027).
- TANG J, SU J T, YAO Y G, et al. Technical analysis of power system frequency regulation by wind power for new power system [J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(7): 1-8. DOI: [10.19666/j.rlfid.202202027](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202202027).
- [18] 高啸天, 匡俊, 楚攀, 等. 化学电源及其在储能领域的应用 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(4): 1-10. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.001).
- GAO X T, KUANG J, CHU P, et al. Chemical power sources and their applications in energy storage fields [J]. *Southern Energy Construction*, 2020, 7(4): 1-10. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.001).
- [19] 张东辉, 徐文辉, 门锟, 等. 储能技术应用场景和发展关键问题 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 1-5. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.001).
- ZHANG D H, XU W H, MEN K, et al. Application scenarios of energy storage and its key issues in development [J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(3): 1-5. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.001).
- [20] 罗佑坤, 乔志园, 辛晟. 南方电网电池储能技术应用及发展机会探讨 [J]. *水电与新能源*, 2020, 34(9): 16-20. DOI: [10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.09.005](https://doi.org/10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.09.005).
- LUO Y K, QIAO Z Y, XIN S. Application and development opportunities of the battery energy storage technology in China southern power grid [J]. *Hydropower and new energy*, 2020, 34(9): 16-20. DOI: [10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.09.005](https://doi.org/10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2020.09.005).

---

作者简介:



陈雷

陈雷 (第一作者, 通信作者)

1989-, 女, 江西吉安人, 高级工程师, 中国矿业大学电力系统及其自动化硕士, 主要从事电力系统规划、新型储能与新能源等研究工作 (e-mail) chenlei4@gedi.com.cn。

文婷

1983-, 女, 湖北荆州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事能源规划咨询、能源体制机制研究、电力规划咨询、双碳咨询等工作 (e-mail) wenting@gedi.com.cn。

(编辑 孙舒)