

DOI: 10.19666/j.rlfed.202404081

# 克劳修斯熵在多时间尺度储能 配置问题上的应用

孙振新, 李海昭, 张秩鸣, 马俯波, 蒋丛进, 张超群  
(国家能源集团新能源技术研究院有限公司, 北京 102211)

**[摘要]** “功率熵”能够定量反映多尺度储能配置的特性差异。采用 2 种正弦功率曲线合成的功率曲线, 重点研究了调频、调峰以及跨季节调节等储能应用主要场景的熵值差异和特性。结果显示: 功率熵能够有效体现不同时间尺度储能特性的差异; 调频、调峰 2 种调节类型宜采用 2 套储能组合配置; 对于频率和幅值差异在 2 倍以内的 2 种调节类型, 则宜采用 1 套储能配置整体调节。该研究从理论方面探索了多时间尺度储能配置的方法和依据, 揭示了多时间尺度问题的本质差异, 有助于形成科学的最优储能配置、调度和优化方案。

**[关键词]** 储能技术; 配置优化; 功率熵; 多时间尺度

[引用本文格式] 孙振新, 李海昭, 张秩鸣, 等. 克劳修斯熵在多时间尺度储能配置问题上的应用[J]. 热力发电, 2024, 53(9): 92-99. SUN Zhenxin, LI Haizhao, ZHANG Zhiming, et al. Application of Clausius entropy to energy storage configuration problems at multi-time scale[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 92-99.

## Application of Clausius entropy to energy storage configuration problems at multi-time scale

SUN Zhenxin, LI Haizhao, ZHANG Zhiming, MA Fubo, JIANG Congjin, ZHANG Chaoqun  
(New Energy Technology Research Institute, CHN Energy, Beijing 102211, China)

**Abstract:** “Power entropy” can quantitatively reflect the characteristic difference of multi-time scale energy storage configuration. The power curve synthesized by two sinusoidal power curves is used to study the entropy difference and characteristics of main scenarios of energy storage applications such as frequency regulation, peak regulation and cross-season energy regulation. The results show that, power entropy can effectively reflect the difference of characteristics of energy storage for different time scales. For the scenarios of frequency regulation and peak regulation, using two sets of energy storage is better. For the scenarios that the difference between frequency and amplitude is less than 2 times, it is appropriate to apply a single set of energy storage. The research theoretically explores the methods and basis of multi-time scale energy storage configuration, reveals the essential differences of multi-time scale problems, it is helpful to form a scientific and optimal energy storage configuration scheme, scheduling scheme and optimization scheme.

**Key words:** energy storage technology; optimal configuration; power entropy; multi-time scale

1854 年克劳修斯在《力学的热理论的第二定律的另一种形式》中提出可逆循环过程中热力学第二定律的数学表示形式, 即提出了熵<sup>[1]</sup>。此后克劳修斯熵在热力学领域得到了广泛应用, 并逐渐形成了玻尔兹曼熵、信息熵、熵权法<sup>[2]</sup>、样本熵<sup>[3]</sup>、排序

熵<sup>[4]</sup>、潮流熵<sup>[5-6]</sup>等理论。

熵理论在电力系统应用广泛, 包括储能调节能力分析<sup>[7]</sup>、混煤掺烧<sup>[8-9]</sup>、发电机状态识别<sup>[3-4]</sup>、电力系统可靠性评价<sup>[10]</sup>、故障风险评估<sup>[11-12]</sup>、最优潮流<sup>[5]</sup>、负荷分配<sup>[13]</sup>、系统优化<sup>[14-15]</sup>等领域。文献[7]基于克

收稿日期: 2024-04-22 网络首发日期: 2024-06-18

基金项目: 国家能源集团科技项目 (GJNY-20-124)

Supported by: Science and Technology Project of National Energy Group (GJNY-20-124)

第一作者简介: 孙振新 (1983), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源、储能技术, 12024114@chnenergy.com.cn。

劳修斯熵理论,给出了一种能量调节性能的分析方法,并介绍了基于“功率熵”的能量调节系统优化配置的方法和案例。文献[8,16]基于克劳修斯熵,研究了热力学熵和机械熵的特点,并提出了提升经济性和储能效率的方法。文献[17]则基于信息熵的特点,结合分形理论,给出了熵理论在储能领域应用的方法。

电力系统的储能调节作用是多时间尺度的,且是不同时间尺度下的周期函数,包括调频、调峰以及季节性调节等。不同储能类型装置,如电池储能<sup>[18-19]</sup>、抽水蓄能<sup>[20]</sup>、压缩空气储能<sup>[21]</sup>和电-氢耦合储能<sup>[22]</sup>等,在多时间尺度场景下的调节特性差异明显<sup>[23]</sup>。多时间尺度问题的分析方法也有很多研究,如文献[24]采用经验模态分解法完成功率、容量规划,并分析了其对经济性的影响。文献[25]给定储气与储电的协调运行策略,进一步分析其对新能源消纳和综合经济性的影响,解决不同时间尺度下储能的协调配合问题。文献[26]采用模型预测控制和交替方向乘法,实现耦合出力与成本双层控制,提高了运算效率和有效性。相关研究侧重从可再生能源消纳和经济性等工程应用角度,研究多时间尺度问题,而基于储能调节需求方面的理论研究相对较少。基于工程应用和基于调节需求的差异在于是否能够充分体现储能的时间价值,比如相同功率的飞轮储能与锂电储能是有显著差异的,如自耗散、储电量等,而不仅是经济性的问题。

由于功率熵能够有效体现多时间尺度条件下储能配置差异,因此本文尝试从功率熵角度定量研究多尺度问题,分析不同频率、幅值的合成功率曲线对熵值的影响,尝试构建分析多时间尺度的理论方法。

## 1 多时间尺度储能配置研究方法

电力系统功率曲线通过傅里叶变换可以得到一系列的正弦、余弦曲线。本文为简化计算,采用2种正弦曲线叠加形成功率曲线,并根据文献[7]所述计算方法,分析功率曲线对应的功率熵特性,探索合理调节资源的配置方法。具体方法为:首先,确定储能运行的功率曲线;其次,根据储能运行的功率曲线确定储能的容量和最大功率等参数;第三,计算标准化的熵值;最后,根据熵值大小确定配置方案是否合理。具体步骤如下。

1) 根据给定的2条正弦曲线( $P_1, P_2$ ),计算合

成功率曲线( $P_\Sigma$ )。

$$\begin{cases} P_1 = A_1 \sin[\omega_1(T_{ub1} - T_{lb1})] \\ P_2 = A_2 \sin[\omega_2(T_{ub2} - T_{lb2})] \\ P_\Sigma = P_1 + P_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A_1, A_2$ 为幅值; $\omega_1, \omega_2$ 为角频率; $T_{lb1}$ 和 $T_{lb2}$ 为功率曲线起始点的时间坐标; $T_{ub1}$ 和 $T_{ub2}$ 为功率曲线结束点的时间坐标。

2) 确定能满足各功率曲线( $P_1, P_2, P_\Sigma$ )的储能配置,即在假设每条功率曲线都可以由1套对应的储能装置提供所需功率。定义储能功率为对应功率曲线的最大功率 $P_{max}$ ;储能容量时长 $T_{cap}$ 为储能运行周期内的最大充电量除以最大功率,由式(2)计算;储能持续时长 $T_{sto}$ 为从开始充电到开始放电的时间间隔(详见5.5节)。

$$T_{cap} = \frac{1}{P_{max}} \int_{T_{lb}}^{T_{lb}+T_{sto}} P dT \quad (2)$$

式中: $T_{sto}$ 为储能持续时长。

3) 计算储能装置标准化功率熵。给定重要参数标准化时间参数 $T_0$ ,由式(3)计算标准化功率熵。其中,第一项积分为充电时的熵值,第二项积分为放电时的熵值。(本文对计算做了简化,且考虑储能装置充放电无损失,并取 $P_{min}=-P_{max}$ )。本文算例中 $T_0=1$ 。

$$S = \int_{T_0}^{T_0+T_{cap}} \frac{P_{max}}{T} dT + \int_{T_0+T_{sto}}^{T_0+T_{sto}+T_{cap}} \frac{P_{min}}{T} dT \quad (3)$$

式中: $S$ 为标准化功率熵。

4) 根据熵值特点分析合理配置。由于 $P_1$ 和 $P_2$ 有对称性,因此计算中可通过调整其中1条曲线的参数研究相关特性,并可取 $\omega_2 \geq \omega_1$ 。本文通过调整 $P_2$ 的幅值 $A_2$ 和角频率 $\omega_2$ ,来分析 $P_1, P_2$ 和 $P_\Sigma$ 对应的熵值变化规律。

## 2 功率曲线算例

本文主要针对由2种正弦功率曲线合成的功率曲线进行分析,分为3类情况:1) 频差较大的调峰调频情况(I类情况),类比调峰需求和调频需求,且调频功率需求小于调峰功率需求,即 $n_2 \gg n_1, A_2 < A_1$ ( $n$ 代表某时间段内功率曲线的周期数, $A$ 代表功率曲线的幅值);2) 频差接近的情况(II类情况),类比2个同时存在的调频信号或者调峰信号等同类型信号,重点研究 $n_2 < 4n_1, A_2 < 4A_1$ ;3) 对于其他情况将给出图形并做简要说明,如日常调峰与

跨季节调峰情况 (III 类情况), 即  $n_2 \gg n_1$ ,  $A_2 > A_1$ 。

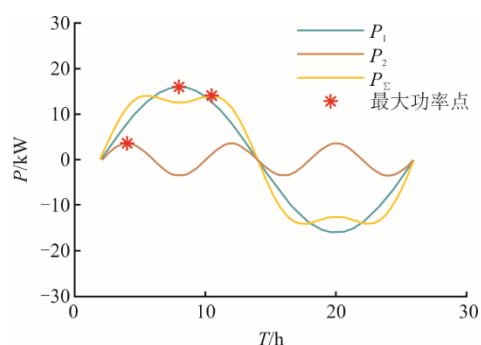
目标功率曲线  $P_\Sigma$  为时间段  $T$  内 2 条正弦功率曲线  $P_1$ 、 $P_2$  叠加, 其中,  $T \in [T_{lb}, T_{ub}]$ 。角频率  $\omega$  通过式(4)由  $[T_{lb}, T_{ub}]$  内的周期数  $n$  计算得到,  $n$  为实数。考虑  $P_\Sigma$  在前半个周期可能出现负值, 规定  $T_{sto\Sigma} = T_{sto1}$ , 计算所得功率曲线示意如图 1 所示。算例具体参数见表 1。  $P_2$  参数  $A_2$  和  $n_2$  为实验参量,  $A_2$  为正实数,  $n_2$  为实数, 且  $n_2 \geq n_1$  (部分计算结果包含了  $0 < n_2 < 1$  的情况)。

$$\omega = \frac{2\pi n}{T_{ub} - T_{lb}} \quad (4)$$

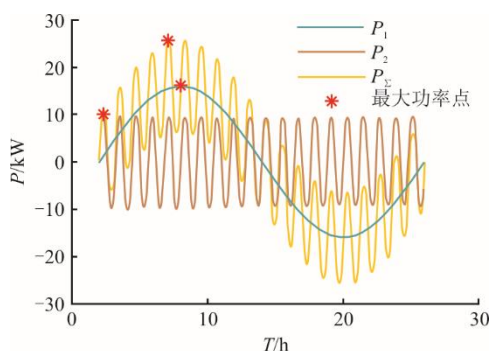
表 1 算例具体参数

Tab.1 Parameters of the calculation examples

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$P_\Sigma$ 的时间起点 $T_{lb\Sigma}/h$	2	$P_\Sigma$ 的时间终点 $T_{ub\Sigma}/h$	26	$T_0/h$	1
$T_{lb1}/h$	2	$T_{ub1}/h$	26	$A_1/kW$	16
$T_{lb2}/h$	2	$T_{ub2}/h$	26	$n_1$	1



a)  $A_2=3.5$ ,  $n_2=3$  时的功率曲线



b)  $A_2=10$ ,  $n_2=20$  时的功率曲线

图 1 功率曲线分解示意

Fig.1 Schematic diagram of power curve decomposition

### 3 计算结果

根据给定正弦函数曲线 2 条以及合成功率曲线, 计算低频 ( $n_2=2$ )、高频 ( $n_2=20$ )、低幅 ( $A_2=0.1$ )、

高幅 ( $A_2=8$ ) 的相关参数, 结果见表 2。表 2 中  $ES_1$ 、 $ES_2$  和  $ES_\Sigma$  分别代表能满足  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_\Sigma$  功率曲线的储能装置。满足功率曲线  $P_\Sigma$  的储能配置方式有 2 种: 一种是  $ES_1$  和  $ES_2$  的组合储能方案 (相关求和后的参量以下标 1+2 表示); 另一种是单个储能方案  $ES_\Sigma$  (相关参量以下标  $\Sigma$  表示)。

表 2 多时间尺度储能配置算例计算汇总

Tab.2 Calculation examples summary for multi-time scale energy storage configuration

组别	参数	$ES_1$	$ES_2$	$ES_{1+2}$	$ES_\Sigma$
1 ( $n_2=2$ , $A_2=0.1$ )	功率 $P/kW$	16.00	0.10	16.10	16.00
	$T_{cap}/h$	7.64	3.82		7.64
	能量 $E/(kW \cdot h)$	122.23	0.38	122.61	122.23
	$T_{sto}/h$	12.00	6.00		12.00
	$S/kW$	27.11	0.11	27.22	27.11↓
2 ( $n_2=20$ , $A_2=0.1$ )	$P/kW$	16.00	0.10	16.10	16.06
	$T_{cap}/h$	7.64	0.38		7.61
	$E/(kW \cdot h)$	122.23	0.04	122.27	122.23
	$T_{sto}/h$	12.00	0.60		12.00
	$S/kW$	27.11	0.01	27.12	27.18↑
3 ( $n_2=2$ , $A_2=8$ )	$P/kW$	16.00	8.00	24.00	20.78
	$T_{cap}/h$	7.64	3.82		5.88
	$E/(kW \cdot h)$	122.23	30.56	152.79	122.23
	$T_{sto}/h$	12.00	6.00		12.00
	$S/kW$	27.11	9.10	36.20	32.33↓
4 ( $n_2=20$ , $A_2=8$ )	$P/kW$	16.00	8.00	24.00	23.95
	$T_{cap}/h$	7.64	0.38		5.10
	$E/(kW \cdot h)$	122.23	3.06	125.29	122.23
	$T_{sto}/h$	12.00	0.60		12.00
	$S/kW$	27.11	0.88	27.98	35.39↑

由表 2 可见: 1) 组合储能方案的容量大于单个储能方案; 2) 组合储能方案的最大功率之和高于单个储能方案的最大功率; 3) 2 种方案的熵值大小存在差异, 差异与具体方案有关, 并且存在即使容量较大, 功率之和较大的组合方案, 其熵值也可能较小的情况。

在多时间尺度下储能配置研究方面, 功率熵能够体现幅值和角频率变化引起的差异, 进而也可以作为研究多时间尺度储能配置的“标尺”。下文图 4、图 6 给出了完整的变化趋势曲线, 能够充分体现其标尺作用。

## 4 不同参数下的功率熵特性对比

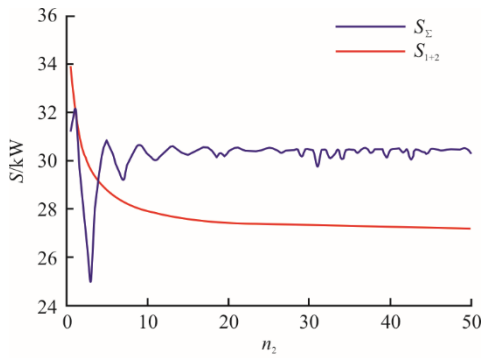
### 4.1 角频率调节对比

若固定  $A_2$  值为 3.0、10.0、0.1,  $n_2$  从 1—50 变化, 角频率-熵值计算结果如图 2 所示。由图 2 可

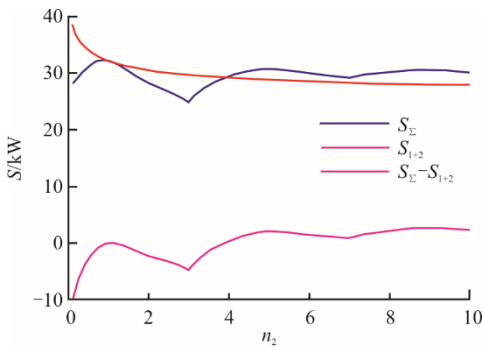
见：存在频率的分界点  $n_{cri}$ ，使得在  $n_2 > n_{cri}$  时， $S_\Sigma$  高于  $S_{1+2}$ ；在  $n_2 \in (1, n_{cri})$  时， $S_\Sigma$  和  $S_{1+2}$  存在若干交点； $n_2=1$  时  $S_\Sigma$  和  $S_{1+2}$  2 条曲线相切。

$n_{cri}$  与  $A_2$  有关， $S_\Sigma$  和  $S_{1+2}$  交点个数也与  $A_2$  有关。计算结果显示： $A_2=10 \text{ kW}$ ， $n_2 \in (1, n_{cri})$  时， $S_\Sigma$  和  $S_{1+2}$  无交点（图 2c）； $A_2=0.1 \text{ kW}$ ， $n_2 \in (1, n_{cri})$  时， $S_\Sigma$  和  $S_{1+2}$  有 10 个交点（图 2d）。实际上，算例中  $A_2 \in (1.9, 46)$ ， $n_2 \in (1, n_{cri})$  时， $S_\Sigma$  和  $S_{1+2}$  无交点，在其他区域随  $A_2$  减小或增加，交点个数均会增加。

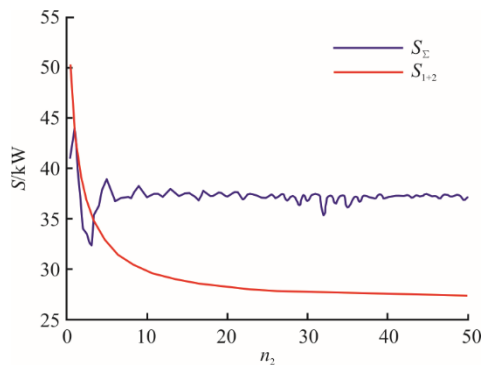
此外， $S_\Sigma$  变化类似于阻尼波，其变化幅度随  $n_2$  增加而减小，典型情况如图 2d) 所示。 $S_\Sigma$  变化周期为 4， $S_\Sigma$  取最大值时  $n_2=4k-3$  ( $k$  为自然数)。图 2b) 中， $n_2=3$  出现最低值，是由于此时  $P_1$  的波峰和  $P_2$  的波谷重合， $P_{\max\Sigma}$  相对最小（图 1a)）， $S_\Sigma$  取极小值时， $n_2=4k-1$  ( $k$  为自然数)。



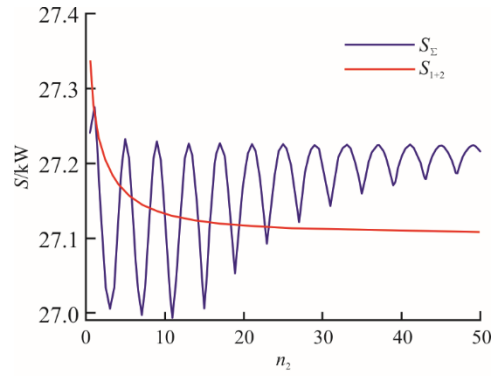
a)  $A_2=3$ ,  $1 \leq n_2 \leq 50$  时的熵值



b)  $A_2=3$ ,  $1 \leq n_2 \leq 10$  时的熵值



c)  $A_2=10$ ,  $1 \leq n_2 \leq 50$  时的熵值



d)  $A_2=0.1$ ,  $1 \leq n_2 \leq 50$  时的熵值

图 2 角频率-熵值变化

Fig.2 Changes of entropy with angular frequency

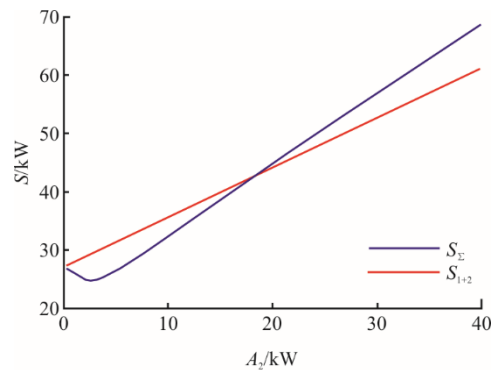
另外，图 2 中存在少量随机波动，如图 2a) 中  $n_2=30$  附近。这是由于算例计算中采用全局最优的遗传算法计算  $P_{\max}$  的最大值，遗传算法为随机算法，计算得到的最大值并非准确值，而且可能为局部最优解，可通过多次计算选取最优解的方式进行优化，以提高准确度。

### 4.2 幅值调节对比

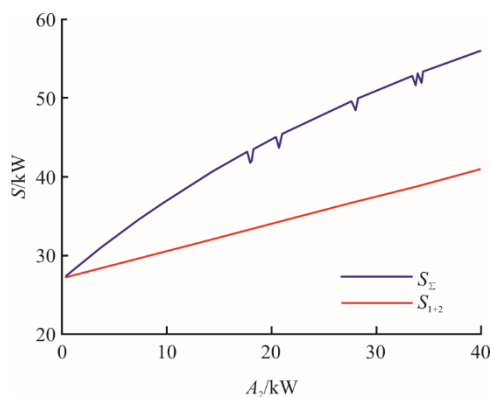
图 3 展示了不同  $n_2$  值的 3 种典型曲线。由图 3 显示： $n_2=3$ ， $1 \leq A_2 \leq 19$  时， $S_\Sigma < S_{1+2}$ ； $n_2=8$ ， $1 \leq A_2 \leq 40$  时， $S_\Sigma \geq S_{1+2}$ ； $n_2=1$  时， $S_\Sigma = S_{1+2}$ 。

上述结果有以下特点：1) 当  $A_2$  大于某临界值时，有  $S_\Sigma \geq S_{1+2}$ ，表明如果 2 条功率曲线其中 1 组幅值足够大时，组合储能方案有更低熵值；2)  $S_\Sigma$  和  $S_{1+2}$  的关系曲线主要有图 3a) 和图 3b) 两种形态，表明在特定的频率下存在单个储能方案的熵值更低的情况；3) 实际上  $S_\Sigma$  和  $S_{1+2}$  的关系曲线非常复杂。

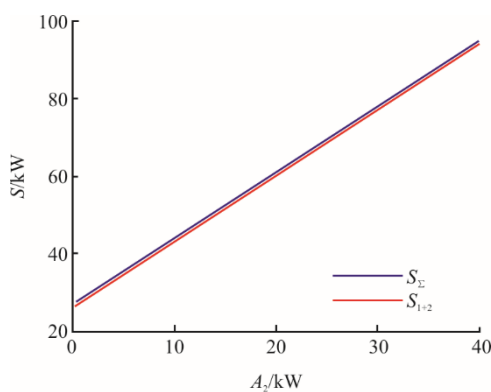
图 3c) 中， $P_1$  和  $P_2$  是 2 条频率、相位完全相同但幅值不同的曲线（即  $n_2=1$ ），同样  $P_\Sigma$  也是。由式(3)可知， $S \propto P_{\max}$ ，可记为  $S=kP_{\max}$ ，此时  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_\Sigma$ 、 $k_{1+2}$  均相等，因而  $S_\Sigma = S_{1+2}$ ，表明频率和相位相同的功率曲线合成后 2 种方案功率熵值相同。



a)  $1 \leq A_2 \leq 40$ ,  $n_2=3$  时的熵值



b)  $1 \leq A_2 \leq 40, n_2=8$ 时的熵值



c)  $1 \leq A_2 \leq 40, n_2=1$ 时的熵值

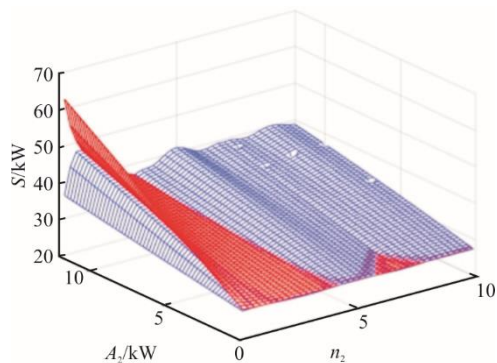
图3 幅值-熵值变化

Fig.3 Changes of entropy with amplitude

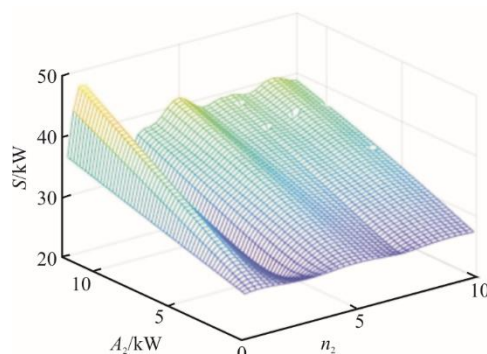
### 5 结果分析

根据功率熵差异,通过调频和调峰分别配置储能的方式是合理的,即选择熵值低的方式配置。由第4节可见:对于调频、调峰或者长时储能等不同频次的调节需求( $n_2 > n_{cri}$ )分类进行储能配置( $ES_{1+2}$ )熵值更低;但在特定区间( $1 < n_2 < n_{cri}$ )单个储能配置( $ES_{\Sigma}$ )熵值更低。

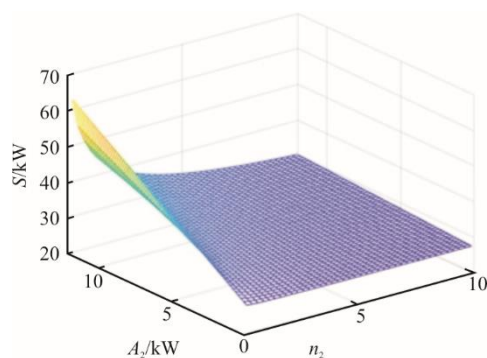
图4为  $A_2 \in [0.2, 12], n_2 \in [1, 10]$  条件下的角频率-幅值-功率熵三维关系。



a)  $S_{1+2}$ 和 $S_{\Sigma}$ 变化



b)  $S_{\Sigma}$ 变化



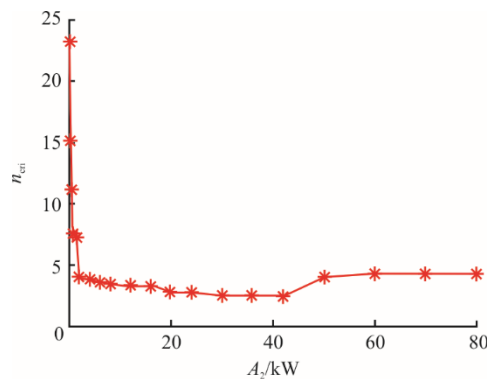
c)  $S_{1+2}$ 变化

图4  $A_2 \in [0.2, 12], n_2 \in [1, 10]$ 下角频率-幅值-功率熵关系  
Fig.4 Relationship between and among angular frequency, amplitude and power entropy when  $A_2 \in [0.2, 12], n_2 \in [1, 10]$

### 5.1 分界点

为便于分析多时间尺度的3类问题,进一步,可将相关特性按照角频率差异,选择  $n_{cri}$  或  $n_{cri}$  附近的值作为分界点,分为大频差 ( $n_2 \geq n_{cri}$ ) 和小频差 ( $1 < n_2 < n_{cri}$ ) 2种进行讨论。 $n_{cri}$  与  $A_2$  有关,如在图2a)、图2b)中可以将  $n_2=4$  作为分界点,主要考虑  $1 < n_2 < 3$  时  $S_{\Sigma} - S_{1+2}$  的取值范围为  $(-4.74, 0)$ , 与  $1 < n_2 < 3.9$  时  $(-4.74, 0.05)$  大致相同。

直接求解  $n_{cri}$  与  $A_2$  的关系曲线较为复杂,可根据若干组  $n_{cri}$  与  $A_2$  数据点连接绘制得到其变化趋势,结果如图5所示。



a)  $A_2-n_{cri}$ 关系

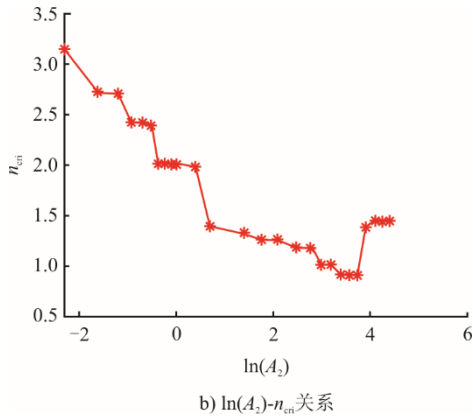


图 5  $A_2$ - $n_{cri}$  关系  
Fig.5 Relationship between  $A_2$  and  $n_{cri}$

由图 5a)可见, 曲线整体呈阶梯状变化, 并且大致可分为竖直段和水平段, 竖直段阶梯下降, 水平段阶梯上升。其中, 曲线在  $A_2=2, n_{cri}=4$  附近有显著转折, 变化趋势由急变缓。因此, 如果综合考虑  $A_2$  及  $n_2$  的影响, 可选择此处为分界点。此外, 本文重点分析不同频次功率信号的熵值差异, 因此选择  $n_2$  设置分界点, 同样由于极值和  $A_2$  也相关, 也可以针对  $A_2$  设置分界点进行分析。

5.2 大频差情况 (I 类情况)

一般而言,  $n_2 \geq 4$  (或  $n_2 \gg n_1$ ) 时, 组合储能方案熵值更低。实际情况中, 调频为秒级信号, 调峰为小时级, 而长时储能一般应对的周期为周、月或者季节。这三者的频率数量级分别为  $1、10^{-3}$  和  $10^{-5}$ , 频差 (本文频差指 2 个正弦函数的角频率差异) 都很大, 考虑  $n_1=1$ , 则  $n_2 \gg 4$ 。因而实际储能配置中, 对于不同频次的调节需求采用不同类型的储能组合。而对于幅值  $A_2$  的影响, 并且考虑调频的实际情况, 调频出力一般远小于调峰的调节幅度, 从图 3b)可见, 在频差较大的情况下, 同样是组合储能更合理。

5.3 小频差情况 (II 类情况)

小频差功率需求下 ( $1 < n_2 < 4$ ), 需根据  $S_{\Sigma} - S_{1+2}$  值具体情况判断。当  $1 < n_2 < n_{cri}$  时用单一储能装置实现调节更合理; 当  $n_{cri} \leq n_2 < 4$  时, 由于熵值接近也可以考虑单一储能装置。如图 3a)算例中  $n_2=3, A_2/A_1 \in (0, 1.13)$  时, 即  $A_2 \in (0, 18.1), S_{\Sigma} < S_{1+2}$ 。

实际中的小频差功率需求对应 2 种频率的调节需求, 而这 2 种调节需求一般调节幅值也相近。如果调节幅值差别不大, 当  $A_2/A_1 \in (0.5, 2.0)$ , 且  $n_2 \leq 2$  ( $n_2=2$ , 且  $A_2=2A_1$  时,  $n_{cri}=2.6$ ) 时, 从图 4a)的计算结果看, 该区域包含于  $(0, n_{cri})$ , 因而采用单个储能更合理。

5.4 其他情况 (包括 III 类情况)

$A_2 \in [1, 320], n_2 \in [1, 10], A_2/A_1 \in (0, 20)$  的角频率-幅值-功率熵关系如图 6 所示。由图 6 可见, 除 I 类和 II 类外的其他情况相对比较复杂, 可通过比较  $S_{\Sigma}$  和  $S_{1+2}$ , 的大小, 选择适合的配置方式。

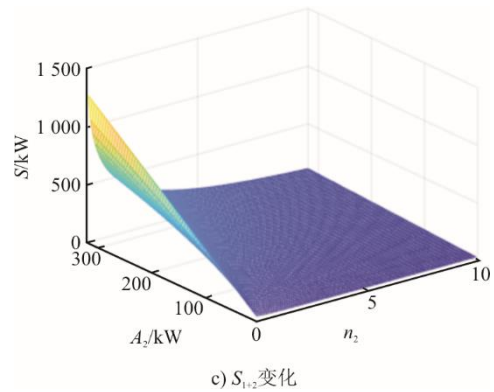
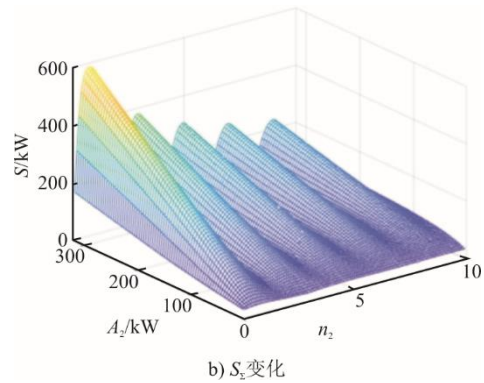
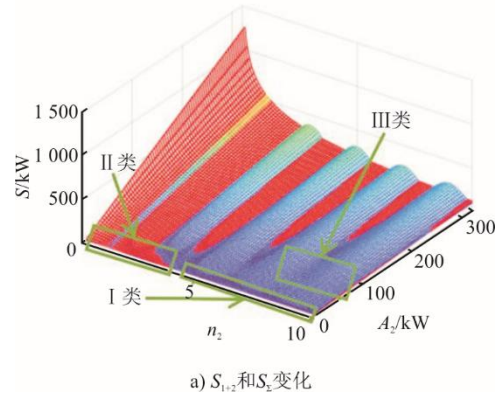


图 6 其他情况下角频率-幅值-功率熵关系  
Fig.6 Relationship between and among angular frequency, amplitude and power entropy under other conditions

此外, 针对  $A_2$  较大的情况对应调峰与跨季节调峰 (长时储能) 的情况 (III 类情况), 即将幅值大、频次高的  $P_2$  看做日常调峰, 而将幅值小、频次低的  $P_1$  看做跨季节调峰。从图 6 中可以看到, 熵值  $S$  与  $A_2、n_2$  相关的特点, 即在一定幅值差范围内, 如果频差足够大, 则需针对跨季节调峰和日常调峰分别

配置储能装置。

### 5.5 计算的补充说明

1) 算例研究中, 对于  $n_2$  非整数情况,  $P_\Sigma$  对应的充放电曲线不对称, 充电  $P_{\max\Sigma}$  与放电  $P_{\min\Sigma}$  的绝对值有差异, 对结果会有影响。本文忽略有关影响, 式(3)中, 以  $P_\Sigma$  前半周期(充电部分)为研究重点, 取  $P_{\min} = -P_{\max}$ 。

2) 文中算例取  $T_{lb1} = T_{lb2} = 2$ , 意味着 2 正弦曲线相位相同, 实际上相对  $S_\Sigma$  和  $S_{1+2}$  也有显著影响, 可做进一步分析。

3) 储能参量和实际功率曲线对应的储能参量。任给一套储能装置, 其储能功率 ( $P_{\max}$ ) 即额定功率, 储能容量时长 ( $T_{\text{cap}}$ ) 为额定充电量与额定功率的比值, 储能持续时长 ( $T_{\text{sto}}$ ) 为在额定功率下连续充放电, 且满足如剩余电量等有关要求(如剩余电量不低于 90%)的条件下, 充电时间起点与放电时间起点间的时间长度。实际(运行)功率曲线对应储能配置参量的计算稍有不同, 第 1 节所述方法是根据实际功率需求给出的储能参量计算方法。

4) 一般功率曲线的储能持续时长 ( $T_{\text{sto}}$ ) 计算方法。对于三角函数而言, 以零点为起点的 1 个周期  $T$  内包含且仅有 1 次充放电,  $T_{\text{sto}}$  计算相对简单, 即  $T/2$ 。而合成曲线计算较为复杂, 因为可能有多次充放电。可以通过在 2 个周期内计算积分电量的最大值确定充电时段, 用积分电量最小值确定放电时段, 进而通过充放电时段的起点计算  $T_{\text{sto}}$ 。本文合成曲线的  $T_{\text{sto}}$  是通过简化计算直接给定的。

## 6 结 论

1) 功率熵能够有效体现不同时间尺度储能的差异。储能功率、储能容量时长以及储能持续时长是影响功率熵值的重要参量。标准化时间是计算标准化功率熵的重要参量。

2) 对于频差较大的 I 类情况, 如调频、调峰需求, 宜采用组合储能方式。同时, 考虑不同储能的调节性能差异, 调用时宜优先调用小型储能装置。

3) 对于频差较小的 II 类情况, 则根据功率熵计算结果确定, 特别是对于频差小于 2 倍的情况, 一般宜采用单个储能方式。

### 【参 考 文 献】

[1] 李鹤龄. 信息熵、玻尔兹曼熵以及克劳修斯熵之间的关系—兼论玻尔兹曼熵和克劳修斯熵是否等价[J]. 大学物理, 2004(12): 37-40.  
LI Heling. The relation between information entropy

Boltzmann entropy and Clausius entropy[J]. College Physics, 2004(12): 37-40.

[2] 付忠广, 杨云溪, 刘炳含. 融合主成分分析的熵权灰色关联度燃气电厂综合评价[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 71-76.  
FU Zhongguang, YANG Yunxi, LIU Binghan. Comprehensive evaluation of gas power plant based on entropy weight grey relevance degree fused with principal component analysis[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 71-76.

[3] 孔羽, 任少君, 司凤琪, 等. 基于样本熵的燃气-蒸汽联合循环机组稳态判定[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 28-34.  
KONG Yu, REN Shaojun, SI Fengqi, et al. State stability determination of gas-steam combined cycle unit based on sample entropy[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 28-34.

[4] 罗睿, 王毅, 仇璐珂, 等. 发电机状态辨识的空间排序熵模型研究[J]. 热力发电, 2022, 51(6): 159-166.  
LUO Rui, WANG Yi, QIU Luke, et al. Research on spatial permutation entropy model for generator state identification[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(6): 159-166.

[5] 靳冰洁, 张步涵, 王珂. 基于熵理论的电力系统最优潮流均衡度分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 80-86.  
JIN Bingjie, ZHANG Buhuan, WANG Ke. Analysis of optimal power flow equilibrium in power systems based on entropy theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 80-86.

[6] 陈中, 胡吕龙, 丁楠. 基于改进熵的风光储互补并网系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 86-91.  
CHEN Zhong, HU Lulong, DING Nan. Optimized operation of wind-solar-battery hybrid power system based on improved entropy[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 86-91.

[7] 孙振新, 张秩鸣, 马俯波, 等. 基于熵理论的能量调节性能研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(5): 1584-1591.  
SUN Zhenxin, ZHANG Zhiming, MA Fubo, et al. Research on energy regulation performance based on entropy theory[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1584-1591.

[8] 肖卓楠, 霍立伟, 高文彬, 等. 基于熵分析的不同煤种对富氧燃烧锅炉的影响[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 76-84.  
XIAO Zhuonan, HUO Liwei, GAO Wenbin, et al. Effect of coal type on oxygen-enriched combustion boiler based on entropy analysis[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 76-84.

[9] 张恩先, 陈有福, 王亚欧, 等. 模糊综合评价法在电厂混煤方案寻优中应用[J]. 热力发电, 2019, 48(10): 117-121.  
ZHANG Enxian, CHEN Youfu, WANG Yaou, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in optimizing coal blending plan for power plants[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(10): 117-121.

[10] 蒋群. 电力系统可靠性裕度评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 3.  
JIANG Qun. Evaluation of power system reliability margin[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011: 3.

[11] 吴伟丽, 刘连光, 王开让. 磁暴扰动下电力系统故障风险评估方法与模型[J]. 中国电机工程学报, 2015,

- 35(4): 830-839.  
WU Weili, LIU Lianguang, WANG Kairang. Risk assessment methods and models of power system fault due to geomagnetic[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 830-839.
- [12] 王惠杰, 张家宁, 王雷雨, 等. 基于模糊分析与信息熵的大型机组故障诊断基准值研究[J]. 热力发电, 2018, 47(3): 32-37.  
WANG Huijie, ZHANG Jianing, WANG Leiyu, et al. Research on fault diagnosis benchmark of large scale unit based on fuzzy analysis and information entropy[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(3): 32-37.
- [13] 丁林军, 陈璟华, 郭壮志, 等. 基于凝聚函数的电力系统经济负荷分配[J]. 宁夏电力, 2016(4): 18-23.  
DING Linjun, CHEN Jinghua, GUO Zhuangzhi, et al. Economic load dispatch of power systems based on aggregate function[J]. Ningxia Electric Power, 2016(4): 18-23.
- [14] 管霖, 卓映君, 周保荣, 等. 复杂波动时间序列的多尺度分解算法及其在可再生能源发电建模应用中的性能评估[J]. 南方电网技术, 2020, 14(6): 11-16.  
GUAN Lin, ZHUO Yingjun, ZHOU Baorong, et al. Multi-scale decomposition algorithms for complicated fluctuant time series and their performance evaluation in renewable energy generation modeling[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(6): 11-16.
- [15] 张儒峰, 姜涛, 李国庆, 等. 基于最大熵原理的电-气综合能源系统概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4430-4441.  
ZHANG Rufeng, JIANG Tao, LI Guoqing, et al. Maximum entropy based probabilistic energy flow calculation for integrated electricity and natural gas systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4430-4441.
- [16] GUO H, XU Y, CHEN H, et al. Corresponding-point methodology for physical energy storage system analysis and application to compressed air energy storage system[J]. Energy, 2018, 143: 772-784.
- [17] ZHOU G Y, CHAN C C, ZHANG D, et al. Smart energy evolution road-map based on the correlation between energy and information[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 3082-3087.
- [18] 刘春阳, 王秀丽, 吴雄. 考虑蓄电池分组优化的风储系统多层次调度策略[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3029-3037.  
LIU Chunyang, WANG Xiuli, WU Xiong. A multi-layer dispatch strategy of combined wind-storage systems considering optimization of battery units[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3029-3037.
- [19] 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 dependance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 6-12.
- [20] 余晓鹏, 李晓萌, 张忠, 等. 抽蓄电站提供多时间尺度备用的优化策略[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 573-582.  
YU Xiaopeng, LI Xiaomeng, ZHANG Zhong, et al. Research on the optimal strategy of pumped-storage power station to provide multiple time-scale reserves[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 573-582.
- [21] 李姚旺, 苗世洪, 尹斌鑫, 等. 考虑先进绝热压缩空气储能电站备用特性的电力系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5392-5404.  
LI Yaowang, MIAO Shihong, YIN Binxin, et al. Power system optimal scheduling strategy considering reserve characteristics of advanced adiabatic compressed air energy storage plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5392-5404.
- [22] 倪鸾, 王育飞, 薛花, 等. 计及多时间尺度不确定性的电-氢一体化储能站随机-鲁棒混合规划[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(3): 846-856.  
NI Luan, WANG Yufei, XUE Hua, et al. Hybrid stochastic-robust planning of an electricity-hydrogen integrated energy storage station considering multi-timescale uncertainty[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(3): 846-856.
- [23] 陈玉敏. 基于场景分析的源荷储多时间尺度协调调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 3.  
CHEN Yumin. Multi-time scale source-load-energy storage coordinated scheduling research based on scenario analysis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 3.
- [24] 韩中合, 张策, 高明非. 基于 EMD 分解的孤岛型综合能源系统混合储能规划[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 72-78.  
HAN Zhonghe, ZHANG Ce, GAO Mingfei. Research on hybrid energy storage planning of isolated integrated energy system based on EMD decomposition[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 72-78.
- [25] 刘超, 陈思宇, 孟冰冰, 等. 考虑电气混合储能的区域能源系统调度方法研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 156-161.  
LIU Chao, CHEN Siyu, MENG Bingbing, et al. Scheduling method for regional energy system considering electric hybrid energy storage[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 156-161.
- [26] 常喜茂, 田资. 考虑储能电池的微电网群双层优化调度策略[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 112-120.  
CHANG Ximao, TIAN Zi. Bi-level optimal dispatching strategy of microgrids system considering battery energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 112-120.

(责任编辑 杨嘉蕾)