

考虑全寿命周期效益的风电场站配储能系统参与一次调频服务容量及功率配置优化

黄润¹, 刘梓宁², 余强¹, 李诗旻², 付娅璐¹, 刘宇明², 周术明¹, 朱思婷²

(1. 云南电网有限责任公司, 昆明 650011; 2. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 为应对风电渗透率的提高对电网调频所带来的挑战, 从风电场站配储能系统的储能成本、实时电量收益、一次调频收益等方面, 建立以储能系统容量和储能系统功率为决策变量的风电场站配储能系统参与一次调频服务全寿命周期成本-收益计算模型。针对一次调频动作量难以精准评估的难点, 采用电力系统频率闭环动态过程开环处理方法建立了考虑风电机组控制和储能系统荷电状态(state-of-charge, SOC)约束的风储联合系统调频模型, 提出以全年频率曲线为输入的风储联合系统一次调频动作量开环计算方法。通过结合风储联合系统调频仿真模型与风电场全年运行频率和功率数据进行仿真分析, 获得了储能系统年储能成本和年一次调频收益的变化规律。结果表明, 装机容量为 30 600 kW 的风电场, 当储能功率为 4 553.6 kW、储能容量为 9 822.6 kWh 时风储联合一次调频收益达到最优。

关键词: 风储联合系统; 一次调频; 全寿命周期效益

Primary Frequency Regulation Service Capacity and Optimization Power Configuration for Wind Farm Station Distribution Energy Storage System Considering Full Lifecycle Benefits

HUANG Run¹, LIU Zining², YU Qiang¹, LI Shiyang², FU Yalu¹, LIU Yuming², ZHOU Shuming¹, ZHU Siting²

(1. Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: To address the challenges posed by the increasing penetration of wind power on grid frequency regulation, this paper establishes a life-cycle cost-benefit calculation model for wind farms equipped with energy storage systems participating in primary frequency regulation services. The model considers energy storage costs, real-time electricity revenue, and primary frequency regulation revenue, with energy storage capacity and power as decision variables. To tackle the difficulty of accurately evaluating primary frequency regulation actions, a frequency regulation model for the combined wind-storage system is developed using an open-loop processing method based on the closed-loop dynamic process of the power system frequency. This model incorporates wind turbine control and energy storage system state-of-charge (SOC) constraints, and proposes an open-loop calculation method for primary frequency regulation actions using annual frequency curves as inputs. By combining the wind-storage system frequency regulation simulation model with annual operational frequency and power data of the wind farm, the change rule of the annual energy storage costs and primary frequency regulation revenue are obtained. The results show that for a wind farm with an installed capacity of 30 600 kW, the optimal primary frequency regulation revenue is achieved when the energy storage power is 4 553.6 kW and the energy storage capacity is 9 822.6 kWh.

Key words: combined wind-storage system; primary frequency regulation; lifecycle benefits

基金项目: 国家自然科学基金集成项目(U22B600010); 中国南方电网有限责任公司创新项目(YNKJXM20222079)

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U22B600010); the Innovation Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (YNKJXM20222079).

0 引言

随着新能源发电技术的大规模普及,风电在电网中的渗透率逐年提升,由于风力发电具有随机性、波动性的特点,对电力系统的调频能力提出了更高的要求。站配储能系统是电力系统的组成部分,可提高系统稳定性,提供灵活性和辅助服务,以克服可再生能源带来的挑战。大规模的风电场站配储能系统虽然可以在系统稳定上提供更多支持,但由此产生的投资成本让储能系统在电网中的经济效益提升不明显。为了提升储能系统在频率稳定方面的应用价值,综合考虑储能应用成本、电量收益等经济因素,亟需研究以此提升储能系统参与调频的效益。

在参与频率控制的储能容量配置研究中,许多学者从系统层级的角度,基于系统频率稳定或频率安全指标提升,对新能源运行场景下储能容量配置优化问题进行了一定的研究。文献[1]提出了一种确定用于微电网初级频率控制的电池储能系统(battery energy storage system, BESS)最佳容量的方法,利用BESS的过载能力来快速处理微电网的一次频率控制。文献[2]提出了一种在扰动后使用减载算法保持电力系统或微电网稳定性的模型,确定长期电池的等效循环和极短时间内微电网频率控制的最佳储能荷电状态(state of charge, SOC)。文献[3]提出了一种用于在孤立电力系统中进行一次调频支持的电池能量储存系统(BESS)布置和容量确定的方法。文献[4]研究了在受到一次频率响应(primary frequency regulation, PFR)和增强频率响应(enhanced frequency regulation, EFR)功率需求时, BESS在电池端电压变化、电流、内部电阻和SOC方面的性能,比较了4种不同的能量管理策略,并分析了替代的电池容量和配置。文献[5]提出一种基于两阶段风电波动平抑模型的混合储能容量配置方法,并构建用于评估储能配置效果的评价指标。文献[6]考虑海上风电场的售电收益、碳交易收益及储能系统的各项成本,提出一种考虑风电不确定性的海上风电场混合储能系统容量配置方法。文献[7]建立了考虑系统碳排放与系统运行风险的储能双层优化模型。文献[8]提出一种基于模糊控制的储能参与一次调频综合控制策略,提高储能的调频能力。文献[9]考虑正常运行、频率稳定

性和系统负荷安全等条件,提出了一种多目标的BESS最优布置和容量确定方案。文献[10]提出了一种基于频率稳定约束的微电网电池储能系统(BESS)规模模型,确保频率维持稳定。文献[11]基于将频率最低点恢复到原始值的要求,提出了一种确定电池储能系统(BESS)容量的方法。文献[12]提出在一次调频阶段,利用电池储能系统(BESS)、光伏系统和LED照明负载协同快速拦截频率偏差,使频率保持在安全范围内。文献[13]提出了一种电池分级算法,用遗传算法优化频率控制器系数,维持微电网频率安全。文献[14]对提供一次频率控制(PFC)服务的BESS进行了最佳容量、寿命等评估。文献[15]考虑了调频备用的约束,提出了一个优化模型,以求得储能系统最佳容量。文献[16]从调峰、调频两个技术层面提出了省级电网储能规模的分析方法。文献[17]分析系统的惯量及调频能力要求,提出了考虑电网惯量及调频要求的储能配置模型。文献[18]提出了一种考虑频率和电压协调控制的高风电系统BESS最优容量和布置策略。

此外,许多学者也从场站层级的角度,基于经济性对储能容量配置优化问题进行了不同程度的研究。文献[19]提出一种采用多目标粒子群算法的考虑边际效益最优的含分布式光伏配电网储能双层优化配置模型。文献[20]建立了基于光伏发电-液化空气储能的短时负荷调峰和长时光伏消纳模型,验证和评估了百兆瓦级光储系统进行短时调峰和长时消纳的技术可行性和经济效益指标。文献[21]针对蒙西区域电网开展全年时间尺度精细化运行模拟,分析不同储能容量配比下对系统低碳、经济、可靠运行性能的提升效益。文献[22]在储能系统提供的辅助服务中,评估备用容量应用的经济价值,设计了经济补偿方法。文献[23]提出一种基于改进希伯特-黄变换的混合储容量优化配置方法,并提出经济最优配置方案。文献[24]提出了一种支持一次调频的BESS容量确定方法,其中的优化模型考虑了投资成本。文献[25]分析了中国未来电力市场中储能的多应用场景下的经济效益。文献[26]建立了储能系统的全生命周期成本模型,对储能系统的经济指标进行了评价和分析。文献[27]采用净现值法对储能系统全生命周期的经济性进行评价。文献[28]构建了储能配合常规火电调峰的双层优化模

型, 利用改进后的粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 与非线性规划协调配合求解, 评估其经济性。文献[29]考虑到风电场与储能多方面的成本, 基于长时间尺度模型, 参考全年风电场的平均出力信息, 优化系统储能配置容量, 但没有考虑到实际电网的频率变化特性和调频动作量。文献[30]建立了储能成本年值、平抑联络线功率、能量供需平衡目标函数, 求解混合储能容量。文献[31]提出一种兼顾经济性和风电消纳效果的储能辅助电网调峰的双层优化配置方法, 分析了其经济性和调峰效果。文献[32]以经济性为目标建立储能配置模型, 提出一种改进的麻雀搜索算法对模型进行寻优求解。文献[33]以储能系统总和成本最小化为目标, 建立了储能系统参与调频和套利的经济模型。文献[34]对频率控制服务的电池储能进行了技术经济分析与优化控制方面的研究。

然而, 上述研究均未综合考虑实际电网的频率特性、频率事件和对应的一次调频动作量, 及其一次调频收益对储能系统容量和储能系统功率配置的影响。在全国建设辅助服务市场的背景下, 一次调频存在巨大的经济潜力, 十分具有研究价值。为此, 本文提出考虑储能全寿命周期效益的风电场站配储能参与一次调频服务的储能容量和功率优化配置方法。

全文框架如下: 首先综合考虑多种影响因素, 以储能容量和功率为决策变量的风电场站配储能全寿命周期成本—收益计算模型; 针对储能一次调频动作量难以准确量化评估的难点提出基于 SFR 模型开环处理的一次调频动作量计算方法及储能容量和功率配置模型简化方法; 然后建立了考虑风电机组控制和储能系统频率控制和荷电状态约束的风储联合系统调频模型, 并通过算例分析计算得到某风电场的成本—收益曲线, 最终得到最优储能容量和功率配置方案。

1 风电场站配储能的成本-效益计算模型

以储能系统容量和功率为决策变量, 综合考虑了储能投资成本、购电成本、损耗成本、一次调频收益等因素的综合成本为优化目标, 储能充放电功率及储能运行状态等因素作为约束, 建立优化模型。

1.1 目标函数

以考虑储能系统投资成本与调频收益考虑的综合成本 C 最小为目标, 综合成本 C 包括储能等年值投资

成本 C_{life} 、储能年购电成本 C_{buy} 、储能年充放电损耗成本 C_{loss} 、一次调频收益 C_{pfr} , 则目标函数可表示为:

$$C = C_{\text{life}} + C_{\text{buy}} + C_{\text{loss}} - C_{\text{pfr}} \quad (1)$$

1) 储能系统等年值投资成本。

储能等年值投资成本 C_{life} 主要分为等年值建设成本 C_1 与年运行维护成本 C_2 两部分, 即:

$$C_{\text{life}} = C_1 + C_2 \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{r(1+r)^{N_{\text{set}}}}{(1+r)^{N_{\text{set}}} - 1} (a_p P_{\text{Bat}} + a_E E_{\text{Bat}}) \quad (3)$$

$$C_2 = a_{\text{fp}} P_{\text{Bat}} + a_{\text{fE}} E_{\text{Bat}} \quad (4)$$

式中: r 为储能折旧率; N_{set} 为储能建设时设定的使用寿命; a_p 为储能系统的功率单价; a_E 为储能系统的容量单价; a_{fp} 为储能单位功率的年运维成本; a_{fE} 为储能单位容量的年运维成本; P_{Bat} 为储能的额定功率; E_{Bat} 为储能的额定容量。

2) 储能系统年购电成本

储能系统向下调频时, 储能系统从系统吸收功率; 储能系统向上调频时, 储能系统则将储存的功率进行释放。储能系统在充电和放电的过程中即在与电网进行交易, 则储能年购电成本 C_{buy} 可表示为:

$$C_{\text{buy}} = \begin{cases} T \sum_{i=1}^K (a_{\text{buy}} P_{\text{B, up}}(i) - a_{\text{sell}} P_{\text{B, down}}(i)), P_{\text{wind}} \leq P_{\text{B, up}} \\ T \sum_{i=1}^K (a_{\text{sell}} P_{\text{B, up}}(i) - a_{\text{sell}} P_{\text{B, down}}(i)), P_{\text{wind}} > P_{\text{B, up}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: a_{buy} 、 a_{sell} 分别为购、售电单价; K 为调频次数; $P_{\text{B, up}}(i)$ 、 $P_{\text{B, down}}(i)$ 分别为第 i 次调频时储能系统的向上、向下调频功率; T 为一次调频持续时间; P_{wind} 为进行一次调频时的风功率大小。

3) 储能年充放电损耗成本

由于储能系统的运行效率问题, 储能系统在充放电过程中会产生一定的能量损耗, 储能年充放电损耗成本 C_{loss} 可表示为:

$$C_{\text{loss}} = T \sum_{i=1}^K (a_{\text{buy}} P_{\text{B, up}}(i) (1 - \eta_c) + a_{\text{sell}} P_{\text{B, down}}(i) (\frac{1}{\eta_d} - 1)) \quad (6)$$

式中 η_c 、 η_d 分别为储能的充、放电效率。

4) 一次调频收益

以南方区域为例, 根据《南方区域电力辅助服务

管理实施细则》^[35]及《南方区域风电并网运行及辅助服务管理实施细则》^[36]中规定辅助服务市场运营规则为收支平衡,对机组一次调频动作合格且实际动作积分电量超过理论动作积分电量70%的部分进行补偿,并根据频差的不同,对一次调频补偿提出了不同的计算方法,当频差超过0.08 Hz时界定为大频差扰动,否则为小频差扰动。理论动作积分电量 G_0 和一次调频的收益 C_{pfr} 的数学函数可表示为:

$$G_0 = T \sum_{i=1}^K \frac{\Delta f(i)}{\delta} \quad (7)$$

$$C_{\text{pfr}} = \begin{cases} (G - G_0 \times 70\%) \times 0.5 \times K_3, & |\Delta f(i)| \leq 0.08 \text{ Hz} \\ (G - G_0 \times 70\%) \times 10 \times K_3, & |\Delta f(i)| > 0.08 \text{ Hz} \end{cases} \quad (8)$$

上述计算方式可用式(9)表示:

$$C_{\text{pfr}} = \begin{cases} T \sum_{i=1}^K (P(i) - \frac{\Delta f(i)}{\delta} \times 70\%) \times 0.5 \times K_3, & |\Delta f(i)| \leq 0.08 \text{ Hz} \\ T \sum_{i=1}^K (P(i) - \frac{\Delta f(i)}{\delta} \times 70\%) \times 10 \times K_3, & |\Delta f(i)| > 0.08 \text{ Hz} \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_3 为一次调频超额积分电量补偿标准, 元/MWh; $\Delta f(i)$ 为频率偏差, Hz; δ 为调差系数。

1.2 约束条件

1) 储能充放电状态约束

储能系统的充电状态和放电状态不能同时存在, 因此加以状态约束, 即:

$$u_{\text{up}}(i) + u_{\text{down}}(i) \leq 1 \quad u_{\text{up}}(i), u_{\text{down}}(i) \in \{0, 1\} \quad (10)$$

式中: $u_{\text{up}}(i)$ 为系统第 i 次向上调频的状态量; $u_{\text{down}}(i)$ 为系统第 i 次向下调频的状态量, 若状态量为1则表示储能系统正在该状态运行。

2) 储能充放电功率约束

储能的充放电功率不能超过其额定功率, 即:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{B, up}}(i) \leq P_{\text{Bat}} \\ 0 \leq P_{\text{B, down}}(i) \leq P_{\text{Bat}} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)表示, 当向上或向下调频时储能系统的功率不能超过储能系统额定功率。

3) 储能 SOC 约束

储能系统需要一个正确且安全的 SOC 变化范围, 使储能系统能够正常运行, 即:

$$S(i) = S_0 + \frac{\eta_c P_{\text{B, up}}(i)}{E_{\text{Bat}}} T - \frac{P_{\text{B, down}}(i)}{\eta_d E_{\text{Bat}}} T \quad (12)$$

$$S_{\min} \leq S(i) \leq S_{\max} \quad (13)$$

式中: S_0 为储能 SOC 的初始值; $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$ 分别为储能 SOC 安全范围的上、下限; $S(i)$ 为第 i 次调频时储能系统的 SOC 值。

2 一次调频动作量计算方法及储能容量和功率配置模型简化

由于前面的计算模型中, 决策变量包括有每次调频的调频功率。考虑到一年内频繁进行调频的情况, 从优化模型求解的角度来看, 精确获取一次调频的功率等数据较为困难, 且将每次调频的调频功率作为决策变量的模型输入规模十分庞大, 含有如此大规模的决策变量在优化模型中将变得难以求解。为了解决上述问题, 必须对储能容量和功率配置模型进行适度简化。在此情境下, 一次调频动作量 G 可被视为频率上调量和频率下调量的绝对值之和, 同时, 储能的向上、向下调频功率与一次调频动作量 G 的关系可用式(14)–(16)表示。

$$G = |G_{\text{up}}| + |G_{\text{down}}| \quad (14)$$

$$G_{\text{up}} = T \sum_{i=1}^K P_{\text{B, up}}(i) \quad (15)$$

$$G_{\text{down}} = T \sum_{i=1}^K P_{\text{B, down}}(i) \quad (16)$$

式中: G_{up} 为向上调频的调频量; G_{down} 为向下调频的调频量。

在 1.1 节储能年购电成本中, 式(5)联立式(14)–(15)可化简为:

$$C_{\text{buy}} = a_{\text{buy}} G_{\text{up}} - a_{\text{sell}} G_{\text{down}} \quad (17)$$

在 1.1 节储能年充放电损耗成本中, 式(6)联立式(14)–(15)可化简为:

$$C_{\text{loss}} = a_{\text{buy}} G_{\text{up}} (1 - \eta_c) - a_{\text{sell}} G_{\text{down}} (\frac{1}{\eta_d} - 1) \quad (18)$$

在 1.1 节一次调频收益中, 式(9)联立式(14)–(15)可化简为:

$$C_{\text{pfr}} = \begin{cases} (|G_{\text{up, s}}| + |G_{\text{down, s}}| - G_0 \times 70\%) \times 0.5 \times K_3, & |\Delta f(i)| \leq 0.08 \text{ Hz} \\ (|G_{\text{up, l}}| + |G_{\text{down, l}}| - G_0 \times 70\%) \times 10 \times K_3, & |\Delta f(i)| > 0.08 \text{ Hz} \end{cases} \quad (19)$$

式中： G_0 为储能系统理论动作积分电量，MWh； $G_{up,s}$ 和 $G_{down,s}$ 分别为小频差扰动时向上调频和向下调频的一次调频动作量； $G_{up,l}$ 和 $G_{down,l}$ 分别为大频差扰动时向上调频和向下调频的一次调频动作量。

由 1.1 节式(7)–(8)可知，一次调频收益取决于储能参与调频带来的一次调频动作量。然而，由于涉及到电力系统频率动态过程，难以精准评估储能系统参与的一次调频动作量。因此，本节首先分析电力系统有功频率闭环过程，并基于电力系统有功-频率特性的特点将上述闭环过程进行开环系统处理，提出以全年频率数据曲线为输入的风储联合系统一次调频动作量开环计算方法。

2.1 电力系统有功频率闭环过程

电力系统受负荷、新能源功率随机扰动，为此系统频率会时刻发生变化。一次调频是系统自动调节从不平衡态回归到平衡态的一种调频方式。平均系统规律(average system frequency, ASF)模型为分析电力系统频率动态过程的常用模型，如图 1 所示。当系统发生功率扰动 ΔP_L 时，系统频率发生变化 Δf ，此时系统处于不平衡态，多台发电机通过改变其有功功率参与调频，使系统频率恢复至稳态值后结束。

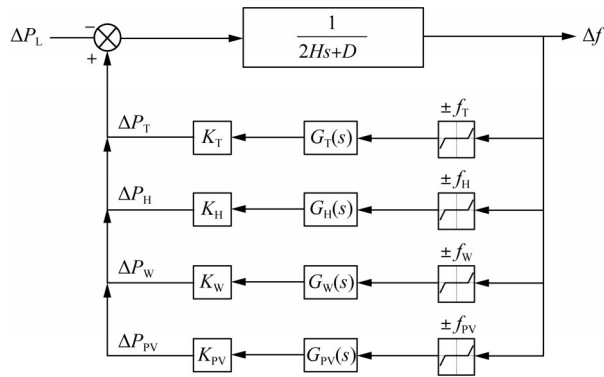


图 1 电力系统 ASF 模型

Fig. 1 ASF modeling of power systems

然而，在储能的全寿命周期内，功率扰动 ΔP_L 的数据难以获取或统计，另外，只有电力调度机构才掌握电网中所有发电机组的调频模型和参数。因此，对于单个风电场来说，无法利用上述模型来计算其站配储能的一次调频动作量。

2.2 一次调频动作量计算方法

通过图 1 可知，系统调频总量是所有机组调频量的总和。对于单个调频机组而言，当其装机容量

占比较小时，其有功功率变化对电网频率闭环过程的影响可忽略不计。因此，可对图 1 的 ASF 模型进行开环处理，即以全年频率曲线作为输入计算风储联合系统的一次调频动作量，如图 2 所示。

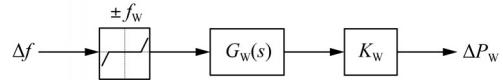


图 2 风储联合系统一次调频动作量计算模型

Fig. 2 Calculation model of primary frequency regulation action quantity of wind-storage combined system

综合上述分析，风储联合系统中储能系统在全寿命周期内的一次调频动作量计算流程如图 3 所示。首先将所得到的频率数据进行一定的预处理，使其便于应用在仿真模型中，所生成的时序信号作为一次调频动作量计算方法的输入，通过仿真计算得到储能系统一次调频动作量数据。

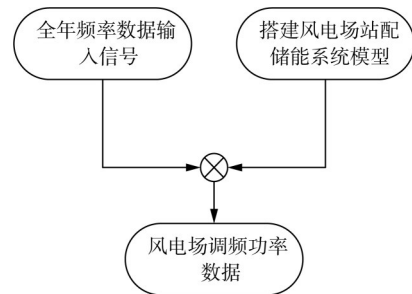


图 3 储能一次调频动作量计算流程图

Fig. 3 Flow chart for calculating the amount of primary frequency regulation action of energy storage

2.3 一次调频动作量与储能容量和功率的量化表达式

通过仿真计算得到了多组储能容量和储能功率对应的一次调频动作量的映射关系，对该数据进行二次多项式拟合，以此得到一次调频动作量与储能系统容量和储能系统功率两个决策变量的量化表达式。并通过该表达式对目标函数较难求解部分进行替换，简化优化模型的求解规模，求解该优化模型即可得到准确的储能系统容量和功率配置优化方案。

3 实例分析

3.1 风储联合系统调频控制模型

风机模型如图 4 所示。风力发电机运行在最大功率点，不参与调频。

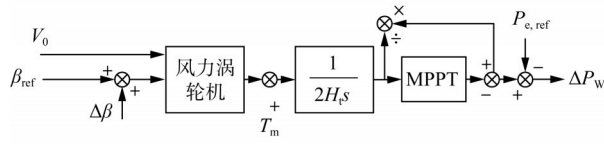


图4 风机模型框图

Fig. 4 Block diagram of wind turbine model

图4中, v 为风速, $\Delta\beta$ 为桨矩角, ω 为风机转速。 β_{ref} 、 P_{ref} 分别为桨矩角、运行功率参考值。

由于风电场出力有随机波动性, 根据《GB/T 19963.1—2021 风电场接入电力系统技术规定》^[38], 风电场应能够实现有功功率的连续平滑调节, 并能够参与电力系统有功功率控制, 因此本文增加风电场了出力平滑功能。风电场及储能系统调频原理如图5所示。其中, 储能系统参与风电出力平衡控制以及调频控制。

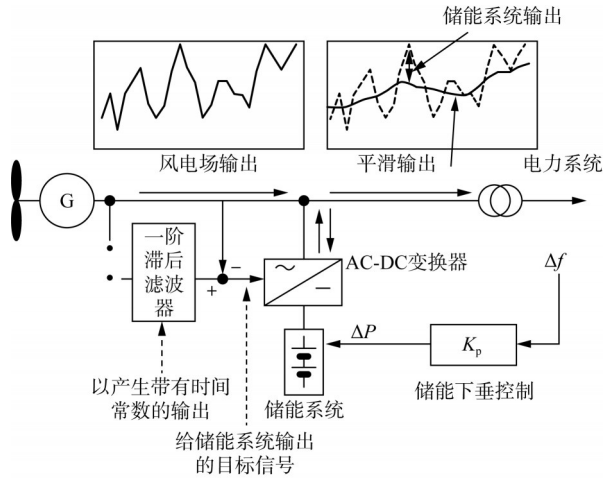


图5 储能调频框图

Fig. 5 Block diagram of energy storage frequency regulation

图5中 Δf 为系统频率偏差, K_p 为储能系统下垂控制系数, ΔP 为储能下垂控制输出功率。风电场输出功率经过一阶滞后滤波器后产生带有时间常数的输出后进入 AC-DC 变换器, 同时结合由频率偏差通过储能系统下垂控制输出的控制功率, 得到综合平滑输出, 以此进行储能系统频率控制。

3.2 分析计算

参考德国2019年全年频率数据^[39], 取一月份数据作为一年中的月平均数据进行仿真分析。图6为德国2019年一月份数据曲线图, 图7为一月份中某一日的频率曲线图。

本文将风电场的装机容量设置为 30 600 kW,

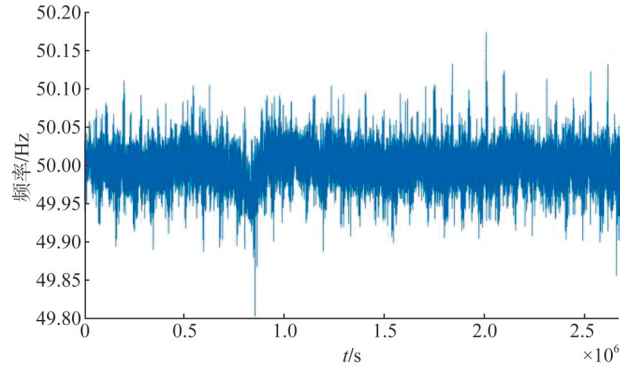


图6 德国2019年一月份频率曲线图

Fig. 6 Frequency curve for January 2019 in Germany

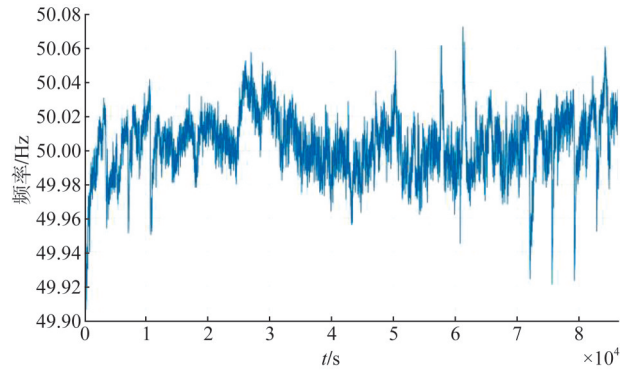


图7 某日频率曲线图

Fig. 7 Frequency curve of a day

储能系统充、放电效率设置为 85 %, 储能系统初始 SOC 值设置为储能容量的 50 %。

应用上述所获得的全年频率曲线进行仿真计算, 得到风储联合系统中储能系统全年的一次调频动作量曲线, 如图8所示, 其中, 某日的一次调频动作量曲线如图9所示。

对德国2019年全年秒级频率数据仿真计算时,

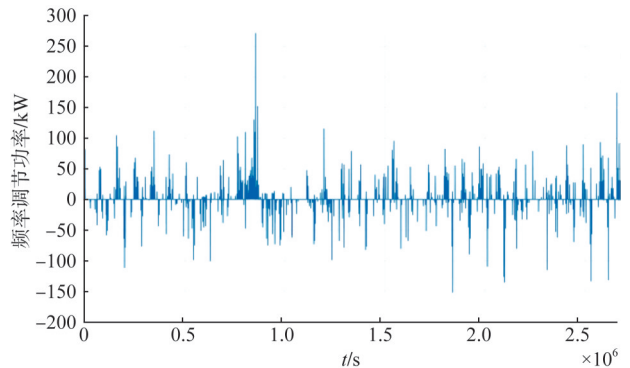


图8 储能系统一月份一次调频动作量曲线

Fig. 8 Frequency regulation action curve for the month of January in the energy storage system

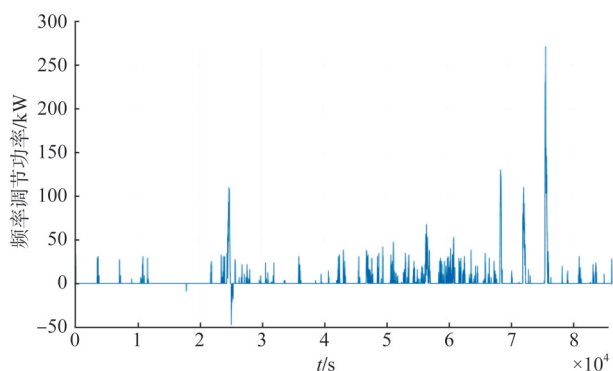


图9 储能系统某日的一次调频动作量曲线

Fig. 9 The amount curve of primary frequency regulation action of the energy storage system on a day

由于计算量庞大, 本文采用一种有效的简化策略。考虑到每个月的频率特性存在一定的相似性, 本文选择以 2019 年 1 月份的数据作为全年的月平均频率数据代表进行频率数据的仿真计算。该决策基于对系统运行的深入了解, 充分利用了数据的统计性质, 以在减少计算复杂性的同时保持对全年电力系统行为的准确建模。

对系统建设及运行成本进行 12 a 的全寿命周期经济性分析。本文储能系统采用常见的磷酸铁锂电池。磷酸铁锂电池具有优良的充放电性能, 累计充放电次数可达 6 000 余次, 年循环次数约 350 次/a, 年运维成本为初始投资成本的 3 %。储能系统的各项成本参数如表 1 所示^[29, 37]。

表 1 储能成本相关参数

Tab. 1 Energy storage cost parameters

参数	数值
建设单位容量成本/(元·kWh ⁻¹)	800
建设单位功率成本/(元·kW ⁻¹)	300
维护单位容量成本/(元·kWh ⁻¹)	24
维护单位功率成本/(元·kW ⁻¹)	9
储能折旧率/%	10
储能系统寿命/a	12
充、放电效率/%	85
购电单价/(元·kWh ⁻¹)	0.60
售电单价/(元·kWh ⁻¹)	0.52

根据前文公式可得储能系统成本随储能功率、容量变化的曲面图, 如图 10 所示。

在不考虑储能投资成本的情况下, 风电场站配储能系统一次调频收益曲线如图 11 所示。

综合考虑储能投资成本, 购电成本, 充放电损

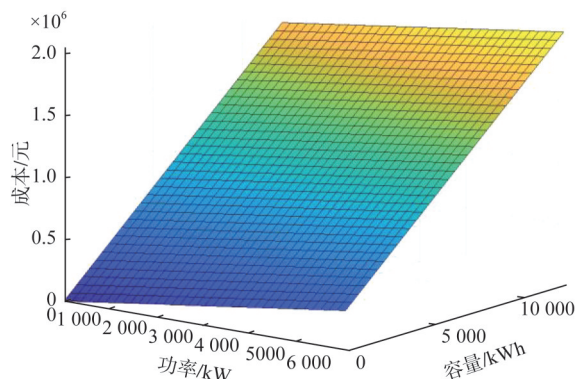


图 10 年储能成本变化曲线

Fig. 10 Energy storage cost change curve for one year

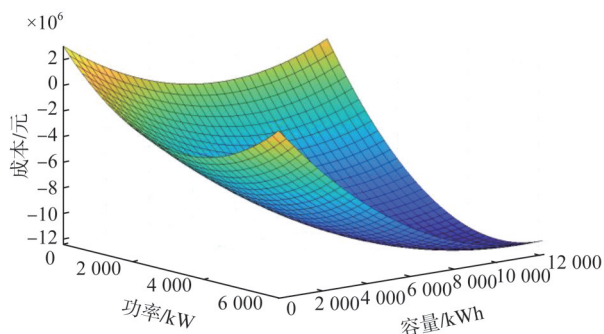


图 11 年一次调频收益曲线

Fig. 11 Primary frequency regulation gain curve for one year

耗以及一次调频收益等因素, 可得风电场站配储能净收益, 风电场站配储能净收益如图 12 所示。

如图 10 所示, 储能成本将随着储能功率和储能容量的增长而增长。如图 11—12 所示, 其中当成本值为负时, 其绝对值将表示风电场站配储能收益大小。将一次调频动作量与储能系统功率和容量的量化表达式代入优化模型, 求解优化模型可知: 综合考虑储能成本、一次调频收益及储能充放电损耗等成本的情况下, 在储能功率为 4 553.6 kW、储

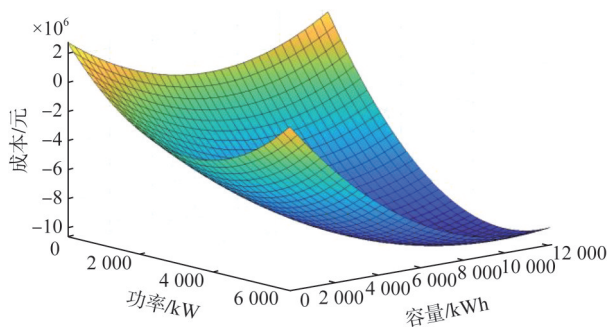


图 12 年净收益变化曲线

Fig. 12 Change in net income curve for one year

能容量为9 822.6 kWh时,年储能成本达到约1 630 492元,年一次调频收益达到约12 332 816元,年储能调频净收益达到10 702 324元,该配置下储能系统可以实现经济性最优。

4 结论

本文以储能投资成本、购电成本、损耗成本和一次调频收益等因素的一次调频综合成本最小为目标建立优化模型,加以储能充放电效率,储能状态以及储能SOC反馈等约束,参考实际电网频率数据和风电场功率数据,分析了风电场和储能系统在考虑一次调频收益的情况下的运行原理,研究了考虑经济性条件下的储能系统功率和容量的配置优化方法。

由上述分析可得出结论:在一定范围内,储能成本与储能调频系统容量与储能系统功率成正比,且储能调频综合收益和储能调频系统容量与储能系统功率综合相关。合理配置储能功率和容量可以显著提升风储联合系统的经济效益,装机容量为30 600 kW的风电场在储能功率达到4 553.6 kW、储能容量达到9 822.6 kWh时,年储能净收益达到最大收益约1 070万元。在储能系统12 a全周期中,储能成本约为1 957万元,一次调频收益约为14 799.4万元,储能净收益约为12 842.8万元。

本文的研究工作可以从以下几个方向进一步改进。首先,可以考虑引入更完善的动态模型,模拟电力系统中风电和储能系统的互动关系,特别是在极端气候条件和突发事件下的表现。此外,随着电池技术的进步和成本的降低,探索更高效的储能技术与风电场的融合,将为优化调频服务提供新的可能性。同时,针对不同地区的风电资源特点开发具有区域适应性的调频策略,将有助于提升电网整体的稳定性与经济性。通过这些研究,风电场与储能系统的协同作用将为实现可再生能源的更大规模应用提供坚实基础。

参考文献

- [1] AGHAMOHAMMADI M R, ABDOLAHINIA H. A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded microgrid [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014(54): 325 – 33.
- [2] GRADITI G, CIAVARELLA R, VALENTI M, et al. Frequency stability in microgrid: control strategies and analysis of BESS aging effects [C]// 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), May 22 – 26, 2016, Hefei, China. New York: IEEE, 2016: 124 – 126.
- [3] RAMÍREZ M, CASTELLANOS R, CALDERÓN G, et al. Placement and sizing of battery energy storage for primary frequency control in an isolated section of the Mexican power system [J]. Electric Power Systems Research, 2018 (160): 142 – 150.
- [4] HU Y, CAO X, SCHOFIELD N, et al. Evaluation of BESS management strategies for grid primary and enhanced frequency response [C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), July 1, 2019, Baltimore, USA. New York: IEEE, 2019: 2530 – 2537.
- [5] 朱明星,齐先军,朱晟,等.基于两阶段风电波动平抑模型的混合储能系统容量配置及效果评价 [J].南方电网技术, 2025, 19(2): 80 – 88.
- [6] ZHU Mingxing, QI Xianjun, ZHU Sheng, et al. Capacity allocation of hybrid energy storage based on two-stage wind power fluctuations smoothing model and effect evaluation [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(2): 80 – 88.
- [6] 陆秋瑜,杨银国,陈俊生,等.考虑风电不确定性的海上风电场混合储能容量优化 [J].南方电网技术, 2025, 19(2): 115 – 123, 134.
- [6] LU Qiuyu, YANG Yinguo, CHEN Junsheng, et al. Hybrid energy storage capacity optimization of offshore wind farms considering wind power uncertainty [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(2): 115 – 123, 134.
- [7] 张志遥,黄婧杰,周年光,等.储能参与低碳灵活调峰的双层优化模型 [J].南方电网技术, 2023, 17(4): 49 – 57.
- [7] ZHANG Zhiyao, HUANG Jingjie, ZHOU Nianguang, et al. Bi-level optimization model of energy storage participating in low-carbon and flexible peak shaving [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 49 – 57.
- [8] 杨永辉,谢丽蓉,李佳明,等.基于模糊控制的储能参与一次调频综合控制策略 [J].智慧电力, 2023, 51(4): 38 – 45.
- [8] YANG Yonghui, XIE Lirong, LI Jiaming, et al. Integrated control strategy of energy storage participating in primary frequency regulation based on fuzzy control [J]. Smart Power, 2023, 51(4): 38 – 45.
- [9] CAO Y, WU Q, ZHANG H, et al. Multi-objective optimal siting and sizing of BESS considering transient frequency deviation and post-disturbance line overload [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023 (144): 108575.
- [10] JAVADI M, GONG Y, CHUNG C. Frequency stability constrained bess sizing model for microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 39(2): 2866 – 2878.
- [11] MUNKHCHULUUN E, MEEGAHAPOLA L, VAHIDNIA A. Optimal battery sizing for large-scale solar-PV generation to improve frequency stability [C]//2019 29th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), November 26 – 29, 2019, Brisbane, Australia. New York: IEEE, 2019: 1 – 6.
- [12] BAGHERI-SANJAREH M, NAZARI M. Coordination of energy storage system, PVs and smart lighting loads to reduce required battery size for improving frequency response of islanded microgrid [J]. Sustainable Energy, Grids and

- Networks, 2020(22): 100357.
- [13] BAGHERI-SANJAREH M, NAZARI M H, GHAREHPETIAN G B. A novel and optimal battery sizing procedure based on MG frequency security criterion using coordinated application of BESS, LED lighting loads, and photovoltaic systems [J]. IEEE Access, 2020 (8): 95345 – 95359.
- [14] CETİNKAYA U, BAYINDIR R, EZGI A, et al. Battery energy storage system sizing, lifetime and techno-economic evaluation for primary frequency control: a data-driven case study for Turkey [J]. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 2022, 10(2): 177 – 194.
- [15] VERMEER W, MOULI G R C, BAUER P. Optimal sizing and control of a PV-EV-BES charging system including primary frequency control and component degradation [J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2022 (3): 236 – 251.
- [16] 陈雷, 文婷. 考虑调峰调频双重约束的储能规划方法研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(2): 62 – 70.
- CHEN Lei, WEN Ting. Research on energy storage planning method considering the dual constraints of peak shaving and frequency modulation [J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(2): 62 – 70.
- [17] 何英静, 王曦冉, 毛安家, 等. 考虑电网惯量及调频要求的储能配置规划 [J]. 电气应用, 2023, 42(2): 9 – 16.
- HE Yingjing, WANG Xiran, MAO Anjia, et al. Energy storage configuration planning considering grid inertia and frequency regulation requirements [J]. Electrotechnical Application, 2023, 42(2): 9 – 16.
- [18] ZHANG Y, KOU P, ZHANG Z, et al. Optimal sizing and siting of bess in high wind penetrated power systems: a strategy considering frequency and voltage control [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 15(1): 642 – 657.
- [19] 彭琦, 欧阳森, 谢运祥. 考虑边际效益最优的含分布式光伏配电网储能双层优化配置[J/OL]. 南方电网技术: 1 – 12[2024 – 10 – 22]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20240506001>.
- PENG Qi, OUYANG Sen, XIE Yunxiang. Considering optimal marginal benefit of distributed photovoltaic distribution network energy storage two-layer optimal configuration[J/OL]. Southern Power System Technology: 1 – 12[2024 – 10 – 22]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20240506001>.
- [20] 游广增, 陈宇, 陈孝元, 等. 考虑短时负荷调峰-长时光伏消纳的液化空气储能系统建模及经济性评估[J]. 南方电网技术, 2023, 17(12): 90 – 100.
- YOU Guangzeng, CHEN Yu, CHEN Xiaoyuan, et al. Modeling and economic evaluation of liquid air energy storage system considering short-term load peak shaving and long-term photovoltaic accommodation [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(12): 90 – 100.
- [21] 何耿生, 陈晖, 张世旭, 等. 储能提升高比例新能源基地低碳-经济-可靠性的效益分析[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 120 – 129.
- HE Gengsheng, CHEN Hui, ZHANG Shixu, et al. Benefit analysis of energy storage to improve low carbon, economy and reliability performance of high proportion renewable energy base[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 120 – 129.
- [22] YE J, XUE J, SANG B, et al. Economic value and government compensation calculative method of energy storage system [C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), April 2 – 3, 2016, Shanghai, China. New York: IEEE, 2016: 536 – 540.
- [23] 葛乐, 袁晓冬, 王亮, 等. 面向配电网优化运行的混合储能容量配置 [J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3506 – 3513.
- GE Le, YUAN Xiaodong, WANG Liang, et al. Capacity configuration of hybrid energy storage system for distribution network optimal operation [J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3506 – 3513.
- [24] MEJÍA-GIRALDO D, VELÁZQUEZ-GÓMEZ G, MUÑOZ-GALEANO N, et al. A BESS sizing strategy for primary frequency regulation support of solar photovoltaic plants [J]. Energies, 2019, 12(2): 317 – 331.
- [25] XU X, LI P, ZHANG X, et al. Economic analysis of electric power storage system for frequency regulation [C]//2016 China International Conference on Electricity Distribution, August 10 – 13, 2016, Xi'an, China. New York: IEEE, 2016: 1 – 5.
- [26] LIU Z, PENG D, YAO J, et al. Economic analysis and research on investment return of energy storage participating in thermal power peak and frequency modulation [C]//2021 Power System and Green Energy Conference, March 26 – 28, 2021, Wuhan, China. New York: IEEE, 2021: 373 – 378.
- [27] HAN X, MU Z, WANG Z. Optimization control and economic evaluation of energy storage combined thermal power participating in frequency regulation based on multivariable fuzzy double-layer optimization [J]. Journal of Energy Storage, 2022(56): 105927.
- [28] 丁亚飞, 古济铭, 宋云亭, 等. 多电源一体化送出系统中储能容量配置 [J]. 电气应用, 2023, 42(4): 78 – 84.
- DING Yafei, GU Jiming, SONG Yunting, et al. Configuration of energy storage capacity in multi-power integrated delivery system [J]. Electrotechnical Application, 2023, 42(4): 78 – 84.
- [29] 冀肖彤, 柳丹, 江克证, 等. 储能型风电场一次调频容量优化与风电功率协调分配 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 58 – 65.
- Ji Xiaotong, LIU Dan, JIANG Kezheng, et al. Primary frequency regulation capacity optimization and wind power coordinated allocation of energy storage-based wind farms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 58 – 65.
- [30] 贾东卫, 任永峰, 李莉美, 等. 基于集合经验模态分解的微电网混合储能优化配置 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 239 – 246.
- JIA Dongwei, REN Yongfeng, LI Limei, et al. Research on optimization of hybrid energy storage capacity using ensemble empirical mode decomposition and fuzzy control [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(2): 239 – 246.
- [31] 邱汉强, 张新燕, 代玥, 等. 参与辅助调峰的电池储能系统优化配置研究 [J]. 现代电子技术, 2023, 46(5): 159 – 163.
- QIU Hanqiang, ZHANG Xinyan, DAI Yue, et al. Research on optimal configuration of battery energy storage system participating in auxiliary peak shaving [J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(5): 159 – 163.
- [32] 王依妍, 陈景文. 基于ISSA的光储微网混合储能容量优化配置 [J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 23 – 29.
- WANG Yiyen, CHEN Jingwen. ISSA-based optimal configuration of optical storage microgrid hybrid energy storage capacity

[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 23 – 29.

[33] 徐天韵, 陈涛, 高赐威. 电力市场背景下的近用户侧储能站容量优化配置研究 [J]. 综合智慧能源, 2023, 45(2): 77 – 84.

XU Tianyun, CHEN Tao, GAO Ciwei. Research on capacity optimization for the user-side energy storage station participating in electric power market [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(2): 77 – 84.

[34] ENGELS J, CLAESSENS B, DECONINCK G. Techno-economic analysis and optimal control of battery storage for frequency control services, applied to the German market [J]. Applied Energy, 2019(242): 1036 – 1049.

[35] 国家能源局南方监管局. 南方区域电力辅助服务管理实施细则 [Z]. 广州: 国家能源局南方监管局, 2020.

[36] 国家能源局南方监管局. 南方区域风电并网运行及辅助服务管理实施细则 [Z]. 广州: 国家能源局南方监管局, 2020.

[37] 李哲, 赵璐. 储能技术的经济性测算与对比 [R]. 中国: 民生

证券研究院, 2022.

[38] 中国电力企业联合会. 风电场接入电力系统技术规定 第 1 部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

[39] RYDIN GORJÃO L, JUMAR R, MAASS H, et al. Open database analysis of scaling and spatio-temporal properties of power grid frequencies [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 6362 – 6370.

收稿日期: 2024-11-16; 网络首发日期: 2025-03-16

作者简介:

黄润(1987), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制, 39069887@qq.com;

刘梓宁(1997), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制, liuzn2@csg.cn;

余强(1987), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为新型电力系统运行分析, yutsiang@foxmail.com。

(上接第 121 页 Continued from Page 121)

表 A2 系统设备相关参数
Tab. A2 Parameters related to system devices

设备名称	参数	数值/kW	运维成本系数/(元·kWh ⁻¹)
燃气轮机	功率上下限; 产电效率; 天然气低位热值	1 500、0; 0.184; 8 000	0.053
可再生能源机组	出力上下限	5 000、0	0.025
电储能	额定功率; 出力上下限	1 200、700; -700	0.03
主电网交互	功率上下限	3 000、0	
空调设备	容量	10 000	
	单台设备投影面积 $S_{\text{scr}}/\text{m}^2$	5	
	等效热阻 $R_{\text{in}}/(\text{℃} \cdot \text{w}^{-1})$	0.014 7	
	传热系数 $\eta_{\text{h}}/(\text{℃} \cdot \text{w}^{-1})$	0.032 6	
机房环境	机房总面积/ m^2	10 000	
	环境温度系数 C_{T}	0.18	

表 A3 不同地域 IDC 的工作负荷转移成本
Tab. A3 Lists the workload transfer costs of IDC in different regions

单位可转移负荷成本(元·GB ⁻¹)	IDC1	IDC2	IDC3
数值	0.2	0.4	0.6