

文章编号:1672-3961(2025)05-0078-10

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.202

电力系统紧急状态下储能与其他可控资源协调控制策略

孙仲卿¹, 赖业宁¹, 张健², 曹雪宁², 张恒旭^{2*}

(1. 国网电力科学研究院有限公司(南瑞集团), 江苏 南京 211106; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 低排放、低惯量、波动的新能源大规模接入显著改变了电力系统的动态特性, 频率响应和安全稳定控制面临严峻挑战。针对紧急状态下的控制需求, 系统分析储能在改善电网稳定性中的作用机理, 研究多类型可控资源的动态特性及其协调潜力。基于响应时序的分类方法, 提出以储能快速响应为核心的可控资源分层协调控制策略, 优化储能系统的充放电决策及控制调整。通过多类型机组系统仿真, 验证所提策略的有效性和适用性。

关键词: 储能机组; 可控资源; 紧急控制; 分层协调控制; 切负荷

中图分类号: TM712

文献标志码: A

引用格式: 孙仲卿, 赖业宁, 张健, 等. 电力系统紧急状态下储能与其他可控资源协调控制策略[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(5): 78-87.

SUN Zhongqing, LAI Yening, ZHANG Jian, et al. Coordinated control strategies for energy storage and other controllable resources in power system emergencies[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(5): 78-87.

Coordinated control strategies for energy storage and other controllable resources in power system emergencies

SUN Zhongqing¹, LAI Yening¹, ZHANG Jian², CAO Xuening², ZHANG Hengxu^{2*}

(1. State Grid Electric Power Research Institute (NARI Group) Corporation, Nanjing 211106, Jiangsu, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: The grid-connected capacity of new energy sources with low emissions, low inertia, and high volatility was rapidly increased, significantly altering the dynamic characteristics of the power system, such as frequency response. This posed great challenges to safety and stability analysis and control. While the high proportion of wind, solar, and storage created operational challenges, opportunities for coordinated control among them were also presented. The mechanism by which energy storage improved stability was explored, considering the characteristics of different types of distributed resources and the control requirements in emergency situations. The characteristics of various controllable resources were analyzed to fully utilize the fast response characteristics of energy storage. These resources were classified based on support time, and the charging and discharging power of the energy storage system was determined, alongside adjustments to control strategies. A hierarchical coordinated operation and control strategy for controllable resources, based on the rapid adjustment of energy storage power, was proposed. The effectiveness of the proposed strategy was verified using a system with multiple types of units as an example.

Keywords: energy storage units; controllable resources; emergency control; hierarchical coordinated control; load shed

收稿日期: 2024-08-13

基金项目: 国家电网有限公司科技资助项目(5100-202240026A-1-1-ZN)

第一作者简介: 孙仲卿(1992—), 男, 江苏南京人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统分析及优化控制等。E-mail: SZQ20240@163.com

* 通信作者简介: 张恒旭(1975—), 男, 山东德州人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制。

E-mail: zhanghx@sdu.edu.cn

0 引言

随着电力系统中新能源占比快速提高,运行工况的不确定性和强波动性加剧了系统安全稳定运行挑战^[1-2]。如何充分发挥可控资源的支撑能力是实现“双高”电网稳定运行的关键,因此研究应对紧急工况的可控资源主动支撑方法具有重要意义^[3-4]。

分布式发电、储能、可控负荷等可控资源具有不同的物理特性和可控能力^[5-6]。储能系统具有灵活输出控制的优势,它既是能源互联网的重要组成部分,也是应对大规模可再生能源并网问题、提高电网经济性和可靠性的重要支撑^[7]。文献[8]在细分连续控制时段的基础上,利用输出电流来约束平衡因子,考虑负荷变化完成多储能系统的荷电状态(state of charge, SOC)稳定均衡控制。文献[9]根据多子网功率盈缺状态,进行灵活储能之间的协调配合。

紧急状态下的协调控制需要考虑不同类型可控资源的出力特性^[10-11],通过系统内的分布式资源,控制系统运行状态实现安全稳定的转移^[12]。由于电力供需平衡仍是新型电力系统运行的基础,风、光发电固有的间歇性和不可控性对多类型资源混合的系统运行带来较大的影响和冲击^[13]。与此同时,新能源机组大规模接入产生的消纳问题也不容忽视^[14]。新型电力系统集成多种能源生产、存储和转换技术,通过对不同类型能源设备的协同管理,实现优化运行多能互补系统与提升可再生能源的发电比例^[15]。面对紧急控制场景时,多种资源协调参与控制,切负荷协同配合同样是拥有巨大潜力的研究方向^[16-17]。文献[18]提出一种具有信息松弛的多态能源协调控制策略,以获取最优协调控制。文献[19]提出基于多储能单元荷电状态的改进模糊控制和下垂控制,实现多储能单元充放电功率自适应分配,保证直流微电网安全可靠运行。文献[20]面向冷热电联供型配电网,将调度过程划分为电源层与用户层并按上下级进行协调优化。文献[21]以直流闭锁后紧急控制代价最低为目标,考虑多元异质资源控制量约束、功率平衡和暂态频率安全约束,建立多类型资源协调的频率紧急控制模型。

当前的协调控制策略通常会令储能系统在紧急情况下保持最大功率输出。如果储能 SOC 不足,输出功率将难以达到预期。相当于在紧急情

况下出现新的功率缺额,协调控制系统很难维持稳定。因此,针对以储能为基础的异构资源分层控制问题,本研究探讨了储能用于紧急控制的优势,并提出针对储能机组不同运行状态的控制策略。

1 可控资源参与频率响应对比

1.1 可控资源出力特性

储能的虚拟惯性和调频能力与同步发电机存在本质区别。传统火电机组发电机和原动机的总惯量靠施加转矩的不平衡来加速,机组转矩为^[22]

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_e, \quad (1)$$

式中: J 为转动惯量, ω 为转子角速度, M_m 和 M_e 分别为发电机的机械转矩和电磁转矩。

同步机惯性时间常数被定义为机组额定转速运行下的转子动能与额定容量比值,同步机惯性时间常数为^[23]

$$H_s = \frac{E_k}{S_N} = \frac{J\omega_n^2}{2S_N}, \quad (2)$$

式中: H_s 为惯性时间常数, ω_n 为额定转子角速度, E_k 为额定角速度旋转过程中转子所存储的动能, S_N 为机组的额定容量。

同步机仅在运行时才能够提供惯性,运行即提供惯量,该惯量固定不变,因启停状态使系统惯量呈现离散化特征。由于功率缺额导致系统频率下跌,为了使系统频率保持稳定,储能通过下垂控制模拟同步发电机的出力特性,出力控制量依据测量频率和基准频率的差值确定。储能增发出力为

$$\Delta P_{ESS1} = -K_{ep} \Delta f, \quad (3)$$

式中, K_{ep} 为储能系统设置的比例控制系数, Δf 为频率变化量。

除下垂控制外,储能通过附加虚拟惯性控制提升惯量响应能力,调整有功出力来平抑系统的差额功率,此时储能增发的有功出力 ΔP_{ESS2} 为

$$\Delta P_{ESS2} = -K_{ed} \frac{d\Delta f}{dt}, \quad (4)$$

式中 K_{ed} 为储能系统设置的虚拟惯性控制系数。

储能的虚拟惯性能力与虚拟惯量系数及时间常数相关,可以通过内部控制系统修正。不同于传统机组旋转产生的惯量,此时虚拟惯性具有连续性。同步发电机与虚拟惯性对比如表1所示。

表1 同步发电机惯性与储能虚拟惯性对比
Table 1 Comparison between synchronous inertia and virtual inertia

对比项目	同步发电机惯性	储能虚拟惯性
惯量连续性	固定不变、离散化	连续可设计
惯性响应延时	瞬时动作	存在一定延时
响应能量来源	转子运动	储能中的电能

1.2 储能改善系统频率稳定机理

为维持系统频率稳定,同步发电机需要预留净空提供调频备用,不能满足低惯量系统的频率调节需求。

储能的调节速度更快,出力在限幅范围内调节。出于安全考虑与机组限制,在实际使用中,储能通常也需要设置一定的延时。二者调频能力对比如图1所示。图中, T_{del1} 、 T_{del2} 、 T_{del3} 分别为储能、风光新能源机组的响应延时; T_1 、 T_2 、 T_3 分别为储能、风光新能源机组的爬坡时间。 P_i 、 P_{dis} 、 P_{cp} 分别为同步机、储能和新能源出力最大上调量。

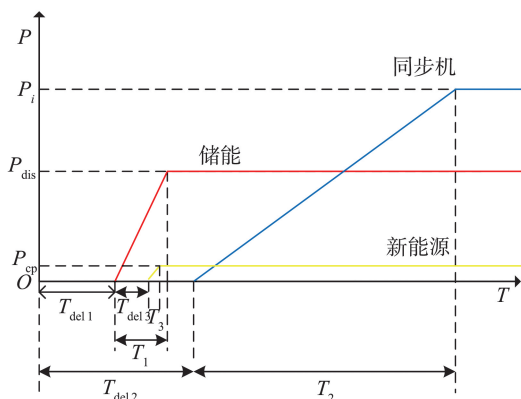


图1 不同资源调频能力对比
Fig.1 Comparison of FM capabilities

文献[24]指出储能可在触发后140 ms内向电网输出有功功率,动作触发后,储能的完全响应时间不超过2 s。因此,在满足快速响应的前提下,储能可在低惯量系统中发挥稳定快速的支撑作用。同步发电机与储能调频相关特性比较如表2所示。

表2 同步发电机与储能调频能力对比
Table 2 Comparison of synchronous machines and energy storage frequency regulation capabilities

对比项目	同步发电机调频	储能调频
响应延时	不大于3 s	不大于0.5 s
完全响应时间	10~20 s	不大于2 s
输出功率耦合	不得超过调速器相应限幅	理论上全功率范围调节,一般设有一定限幅

聚焦紧急控制方面,分析暂态系统频率特性,

频率偏移量为

$$\Delta f = \frac{\Delta P_L - \left(\sum_{i=1}^n \Delta P_i + \sum_{j=1}^m \Delta P_j + \sum_{l=1}^m \Delta P_l \right)}{(2H_s + D)}, \quad (5)$$

式中: Δf 为频率偏移量; ΔP_L 为功率不平衡量; ΔP_i 、 ΔP_j 与 ΔP_l 分别为火电、新能源与储能机组出力调整; H_s 、 D 为系统惯性时间常数与阻尼系数。

其中,系统惯性时间常数 H_s 为

$$H_s = \frac{\sum_{i=1}^n H_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \quad (6)$$

式中, H_i 为第 i 台机组的惯量或虚拟惯量, S_i 为额定容量。

传统的切机、切负荷措施,虽然保证了紧急控制时的功率平衡,但是随着负荷、机组的切除,惯性时间常数 H 与阻尼系数 D 均减小,后续系统承受扰动的能力下降。采用储能功率调制替代传统切机、切负荷措施,将在暂态过程中保留部分机组及负荷的频率响应特性,既保证暂态尺度上快速的频率响应,也在稳态尺度上提供持续的频率支撑,从而改善多时间尺度上的电力系统频率稳定性。

基于上述特性分析,本研究设计的可控资源分层协调控制策略以储能为快速调节功率支撑点,其他可控资源为辅,并推导相关约束。

2 不同运行状态储能紧急控制策略

在多类型资源协同调控的新型电力系统中,利用储能快速充放的优点平抑风电场、光伏电场的波动,储能机组出力为

$$P_{ess} = P_{ref} - P_w - P_{pv}, \quad (7)$$

式中, P_{ref} 为新能源机组系统期望并网功率, P_w 、 P_{pv} 为不受控制的风电场原始功率。 P_{ref} 实际大小要考虑多种因素。由于风光具有较强的波动性, P_{ref} 设定需要考虑通过使用短期预测模型来预测波动带来的不确定性。同时,为使控制策略最优化,如果储能系统的SOC较高,可将 P_{ref} 设定较低,减少充电负担;反之将 P_{ref} 设定较高,使其在最大功率下工作可减少供电负担;当 $P_{ref} > P_w + P_{pv}$ 时,储能将释放自身储存的能量补足两者之间的差距,当 $P_{ref} < P_w + P_{pv}$ 时,储能将吸收过剩功率。

期望并网功率 P_{ref} 的给定需要考虑以下几点。

(1) 系统需求与负荷预测: P_{ref} 应该根据系统的负荷预测和实际需求来动态调整。在负荷高峰时段, P_{ref} 应设定较高, 以确保足够的电力供应; 而在负荷较低时段, 可以降低 P_{ref} , 以减少不必要的功率消耗。

(2) 新能源输出的波动性: 由于风电和光伏具有较强的波动性, P_{ref} 的设定需要考虑到这些波动带来的不确定性。通过使用短期预测模型(例如基于历史数据的时间序列预测或机器学习模型), 可以预估出未来时段的风电和光伏输出, 并相应地调整 P_{ref} 。

(3) 储能系统的状态: 储能系统的当前充放电状态, 也会影响 P_{ref} 的设定。如果储能系统的 SOC 较高, 意味着系统可以承担较大的充电负担, 因此可以将 P_{ref} 设定得更高, 反之亦然。

(4) 频率稳定性要求: P_{ref} 还应考虑系统的频率稳定性要求。在频率较低的情况下, 应适当提高 P_{ref} 以增加新能源发电量并释放储能的能量, 从而稳定系统频率。相反, 在频率较高的情况下, 可以适当降低 P_{ref} 。

(5) 经济性与运行成本: P_{ref} 的设定还应综合考虑经济性。通过优化发电成本和储能成本, 可以在保证系统稳定的前提下, 实现经济效益最大化。这可以通过优化模型, 结合遗传算法等智能优化算法来实现。

新型电力系统中, 储能的出力控制原理如图 2 所示。

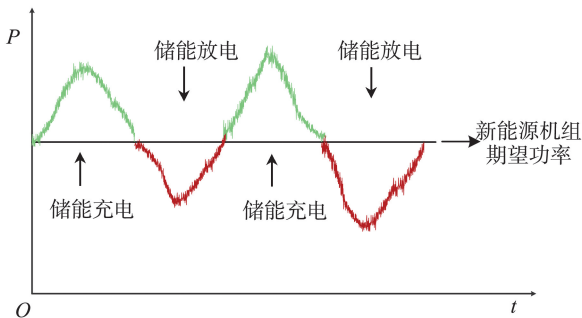


图 2 基于储能的最小负荷波动原理图

Fig.2 Schematic diagram of minimum output fluctuation based on energy storage

随着可再生能源比例提高, 系统惯量水平降低, 系统大概率出现大功率缺额或直流闭锁等故障, 面对频率快速下跌需要启动储能转化模式, 快速提高出力支撑功率。

紧急情况下, 目前常令储能立即调整至最大出

力进行功率支撑。这种控制策略虽在毫秒级响应上支撑起系统功率缺额, 但是没有考虑每个储能的状态, 容易出现由于 SOC 不足而导致的功率下降进而出现新的功率缺额, 恶化了系统频率稳定性。基于此, 提出紧急控制下储能的分类控制, 将储能分为四种运行状态。

首先设置指标最短放电时间 T_{min} 与剩余放电时间 T_{sy} 。最短放电时间 T_{min} 指紧急情况下, 电网要求储能提供功率支撑的最短时间, 剩余放电时间 T_{sy} 指储能按最大功率输出的可持续时间。

下面根据储能工况, 将其分为四类。储能的第一状态, 储能放电且剩余放电时间 T_{sy} 长于最短放电时间 T_{min} , 此时电量充足。储能的第二状态, 储能放电但剩余放电时间 T_{sy} 短于最短放电时间 T_{min} , 电量不足但可以短时间内正常放电。储能的第三状态, 储能处于待机或充电状态。储能的第四状态, 储能放电但电量严重不足, 已无法进行正常出来支撑。

对于第一状态下的储能, 按系统要求时间内最大出力放电支撑功率缺额, 此时储能出力为

$$P_{dis,1}(t) = \frac{S_{t-1} - S_{min}}{\Delta t} \eta_{dus}, \quad (8)$$

式中, $P_{dis,1}(t)$ 为第一状态的输出功率, S_{t-1} 为 $t-1$ 时刻储能剩余电量, S_{min} 为以当前功率输出时储能所允许最小剩余电荷量, η_{dus} 为储能放电效率。

对于第二状态的储能, 应降低功率输出以支撑到最短放电时间, 此时储能出力为

$$P_{dis,2}(t) = P_{dis,1} \sqrt{\frac{S_{t-1} - S_{high}}{S_{max} - S_{high}}}, \quad (9)$$

式中, $P_{dis,2}(t)$ 为第二状态储能的输出功率, S_{high} 为储能允许功率支撑时所对应的最小电量, S_{max} 为储能最大电量。

对于第三状态下的储能, 此时处于充电状态下视为负荷, 应立即转为待机状态减少功率需求, 再根据 SOC 与机组延时要求转化为其他状态。

对于第四状态下的储能, 因荷电量过低不再进行功率支撑, 因此施加控制使其不再充放。

3 含高比例新能源的分层协调紧急控制方法

大规模新能源并入电网后, 需对多种可控资源进行更加深入的分层协调控制。相比于传统系统, 含多类机组系统的协调控制问题具有复杂非线性特点。为充分利用火电机的功率支撑以及储能系统的灵活性, 提出一种分层协调控制方案。该方案

将系统划分为上下两个层次,不同层包含不同的能源资源。

加入切负荷手段后的紧急分层协调控制流程如图3所示。

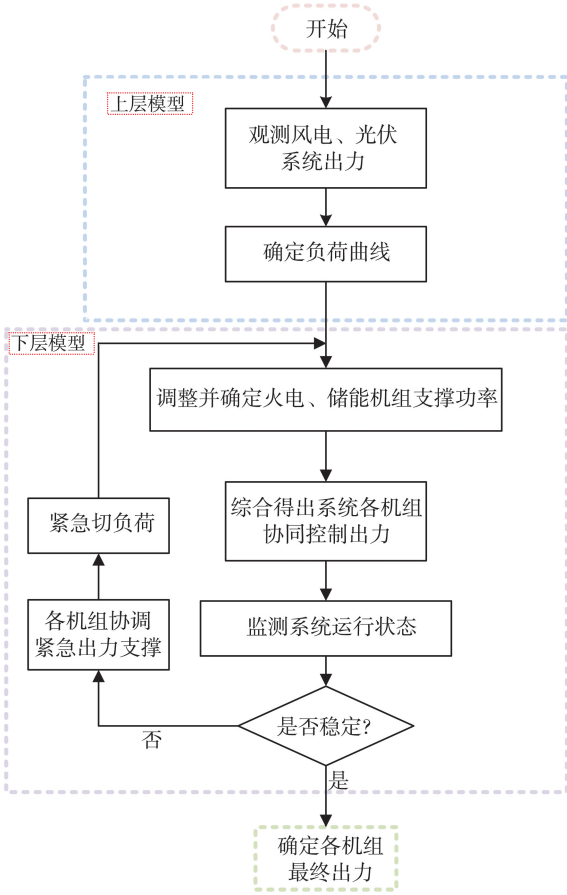


图3 紧急分层协调控制流程图

Fig.3 Emergency hierarchical coordination control flowchart

风电与光伏机组根据当日风光情况进行功率支撑。目前广泛应用的光伏出力公式为^[25]

$$P_{pv} = P_{STC} \frac{G_C}{G_{STC}} [1 + k(T_C - T_{STC})], \quad (10)$$

式中, P_{pv} 为光伏电池板的实际输出功率, k 为功率温度系数, G_C 为实时太阳辐射强度, T_C 为光伏组件表面温度。 P_{STC} 、 T_{STC} 分别为标准测试条件下的额定功率和参考温度。

目前广泛应用的风电机组出力公式为^[26]

$$P_W(t) = \begin{cases} 0, & v(t) \leq v_{in}, v(t) \geq v_{out} \\ P_r \frac{v(t) - v_{in}}{v_r - v_{in}}, & v_{in} \leq v(t) \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v(t) \leq v_{out} \end{cases}, \quad (11)$$

式中, $P_W(t)$ 为风机在 t 时刻的实际输出功率, v_r 为额定风速, v_{in} 为风机的切入风速, v_{out} 为风机的切除风速, P_r 为风机额定功率。

上层模型的核心是确定风电、光伏出力, 储能机组采用恒功率双环控制, 通过调整参考值达到快速调整充放电功率的效果。稳态情况下利用储能跟随风电、光伏和负荷波动的快速响应能力为

$$P_{BESS} = P_{ess} = P_{ref} - P_w - P_{PV}, \quad (12)$$

式中 P_{ess} 为功率偏离量。 $P_{ref} > P_w + P_{PV}$ 时, 新能源机组出力不足, P_{BESS} 取正值, 表示放电功率, 释放自身储存的能量补足两者之间的差距; 当 $P_{ref} < P_w + P_{PV}$ 时, 新能源机组出力过剩, P_{BESS} 取负值, 表示充电功率, 吸收过剩功率。

下层系统主要进行火电和储能机组的功率支撑, 稳态情况下通过上层系统传递的等效负荷曲线以火电机组为支撑提供出力, 输出最终结果。

紧急情况下首先确定功率缺额, 利用不同运行状态下储能的紧急出力控制策略, 确定储能系统出力。利用储能快速响应调整充放电功率完成功率支撑。火电受限于动作时间, 参与一次调频功率恢复。如果储能至最大出力后仍存在较大功率缺额, 则进行紧急切负荷并调整储能出力, 维护系统稳定。切负荷量为

$$\Delta P_{sho.real}(t) =$$

$$\sum_{t=1}^n [P_L(t) - P_G(t) - P_{p,w}(t) - P_{BESS}(t)], \quad (13)$$

式中, $P_L(t)$ 、 $P_G(t)$ 、 $P_{p,w}(t)$ 与 $P_{BESS}(t)$ 分别为 t 时刻下的负荷、火电、新能源与储能机组的功率。

其中储能支撑功率为

$$P_{BESS}(t) = P_{dis,1}(t) + P_{dis,3}(t), \quad (14)$$

式中, $P_{dis,1}(t)$ 与 $P_{dis,3}(t)$ 分别为第一、第三状态的储能机组出力。

可控资源协调控制是一个多约束、变量关系复杂的优化问题, 且各变量之间存在复杂的函数关系。遗传算法(GA)通过模拟自然选择和遗传学机制, 能够有效地进行全局优化。改进的遗传算法在处理多约束问题时显示出更高的灵活性和适应性。传统的遗传算法往往在局部最优解附近徘徊, 而改进的遗传算法通过多样化的操作, 如交叉、变异等, 能够探索更广泛的解空间, 从而避免局部最优, 增加找到全局最优解的机会。在电力系统紧急控制中, 涉及的约束条件包括储能系统的状态、电力输出的实时需求以及系统的频率稳定等。改进的遗传算法通过优化适应度函数和处理约束条件, 能够在满足多种约束的同时, 找到更为优越的控制策略。此外, 改进的遗传算法具有较好的并行计算能力, 能够在处理大规模数据和复杂问题时更为高

效。遗传算法的种群基础和迭代特性使其能够在并行计算环境中高效运行,从而加速优化过程。这在实际应用中表现为较短的计算时间和较快的收敛速度,特别在应对电力系统中的实时调整和紧急响应时,能够提供及时有效的解决方案。鉴于采用遗传算法的优势,在此采用改进遗传算法求解,流程图如图4所示。

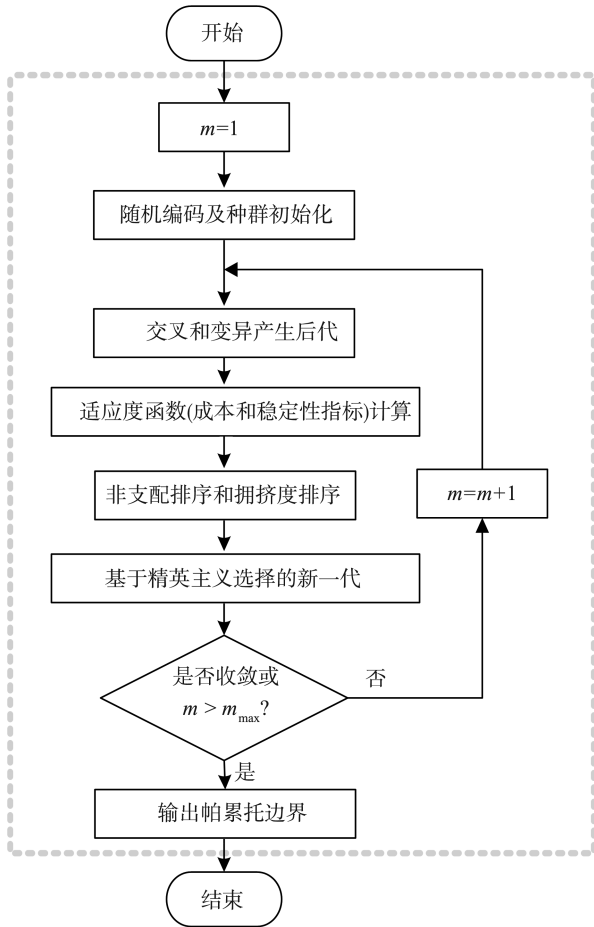


图4 遗传算法流程图

Fig.4 Genetic algorithm flowchart

遗传算法步骤如下。

(1)初始种群生成与编码:生成初始种群,每条染色体代表一种紧急控制手段,染色体基因表示可控资源的控制比例及操作状态,通过编码确定每一基因的初始值,作为迭代起点。

(2)适应度评估与选择:评估每条染色体的控制代价和稳定裕度,选择适应度更高的个体作为父代,为下一代提供优良基因。

(3)交叉与变异操作:通过交叉和变异操作产生新的子代,确保个体的多样性和种群的进化,从而逐步优化紧急控制方案。

(4)迭代与终止条件:设定最大迭代代数或适应度不再提高作为中止条件,不断迭代进化,直至

找到最优解。

经过以上步骤,即可由初始种群 X_1 生成下一代种群 X_2 ,不断循环,直到满足迭代终止条件。

4 算例分析

4.1 算例介绍

为了验证系统内多类型应急资源的协调控制策略,本研究构建了一个包含多类型能源机组的系统,如图5所示。系统中的电源由风能、太阳能、储能(储能机组1与储能机组2)和同步发电机组组成,G代表同步发电机。 L_1 和 L_2 代表有功负载。

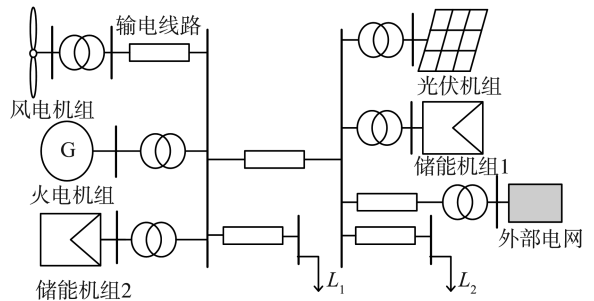


图5 多类型机组系统结构图

Fig.5 Multi-type unit system structure diagram

实际的电力系统中,图5所示的多类型机组系统仅作为一个变电所的单个台区并入系统整体,紧急控制下多个变电所的台区均参与协调控制,提高系统稳定性。为了验证多区之间整体的协调控制,本研究以本地直流异步互联电网为例进行验证,两个互联区域被设置为改进的IEEE 39节点系统,如图6所示。图中A系统与B系统由两个39节点系统组成,二者通过一条高压直流输电系统线路相互连接,该线路的额定输电功率为1 000 MW,电压等级为500 kV。

4.2 不同场景分析

首先,设置光波动扰动小、储能不足的场景。验证站区内多类型资源协同控制的有效性,此时不触发紧急控制,旨在验证。场景设置如下。

场景1:光照扰动,设置光照在仿真运行到4 s时,由1 000 W/m²变为500 W/m²,仿真运行到6 s时,光照由500 W/m²变为800 W/m²,模拟光照扰动;

场景2:储能不足,设置储能初始SOC为30%,当仿真运行到4 s时,SOC下降至26%以下,储能降低输出功率运行。

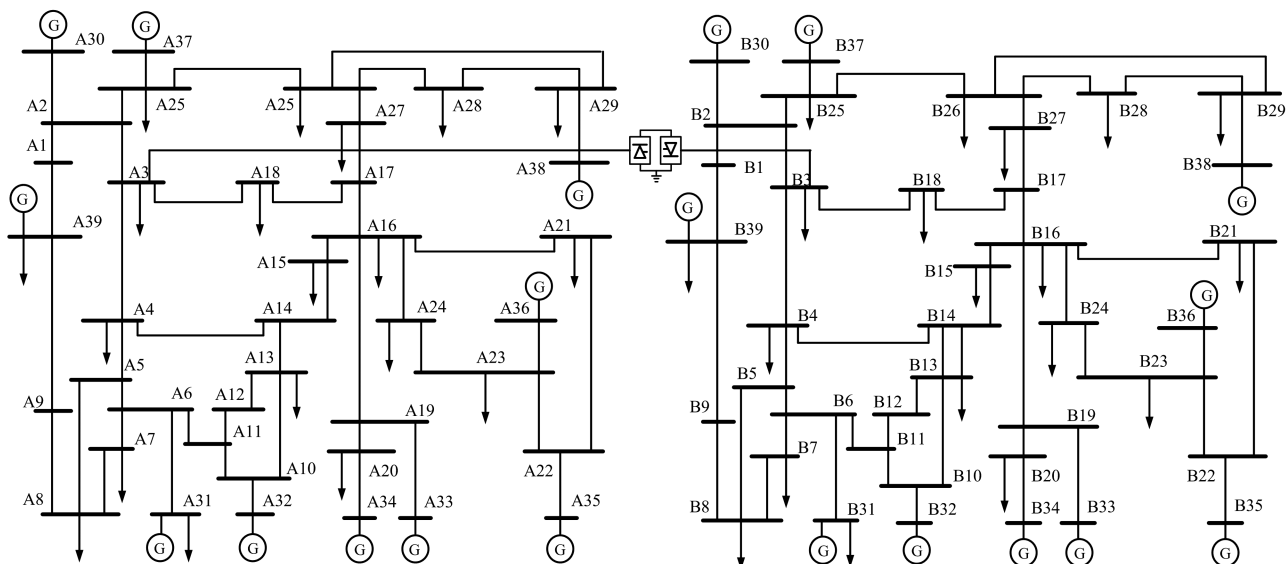


图6 互联电网示意图

Fig.6 The diagram of interconnected electricity network

场景3: 负荷持续增加, 功率支撑不足, 系统频率越下限。

可控负载的协调控制。

首先分析场景1和2。扰动情景下的系统频率波动如图7所示。

场景4: 负荷波动与场景3相同, 加入切除部分

可控负载的协调控制。

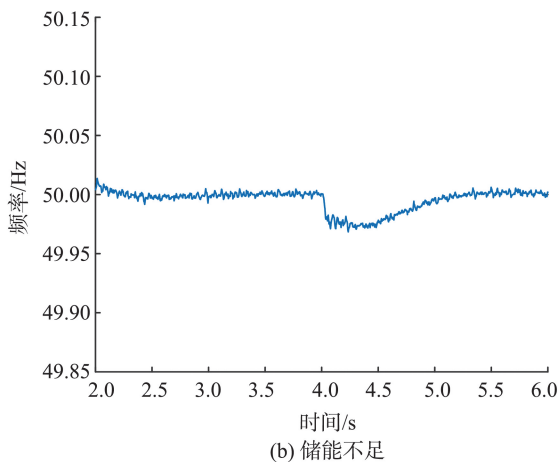
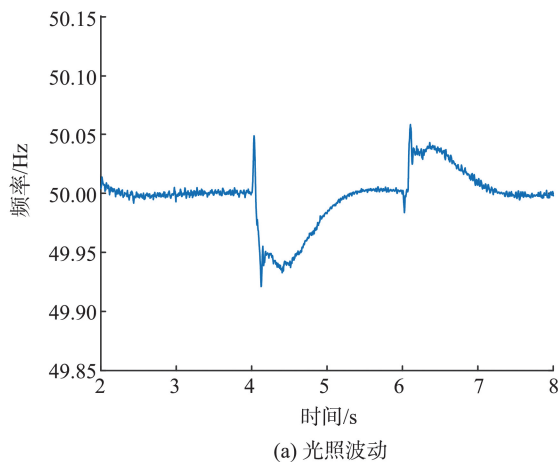
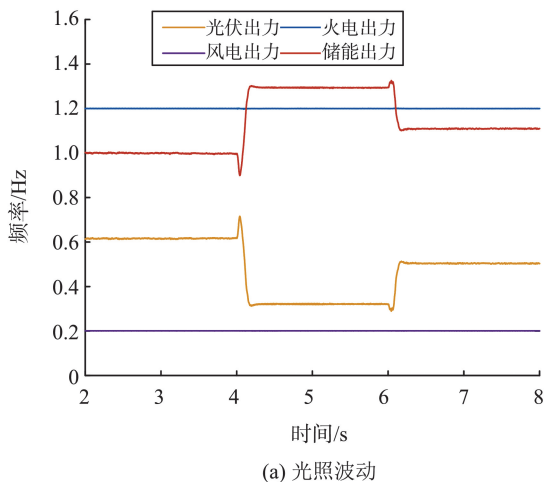


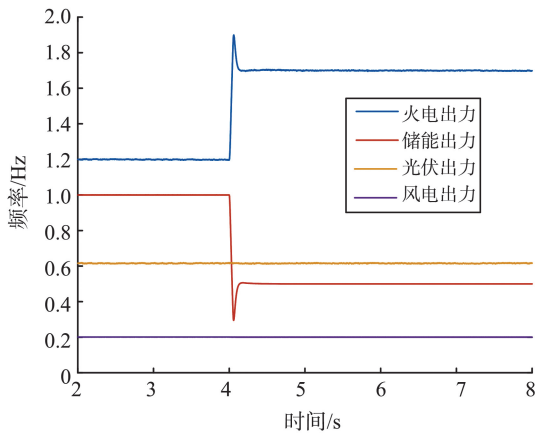
图7 不同扰动下系统频率响应情况

Fig.7 Frequency response under different perturbations

光照波动时系统的频率响应。在光照增强或减弱时, 系统频率在短时间内出现波动。储能系统迅速增加输出功率, 频率很快回到原本水平, 有效防止了频率大幅波动。储能不足的情况下系统频率的变化。当储能 SOC 下降到 26% 以下时, 支撑功率不足, 系统频率也随之下降。火电机组随后增加出力, 稳定了系统频率, 显示了多类型资源协调控制的效果。可以看出, 面对不同的波动场景, 储能单元可以在短时间内完成灵活的输出控制。而火电机组的功率支持可以达到稳定系统频率的效果。

场景1和2中, 各机组出力变化如图8所示。





(b) 储能SOC不足

图8 各机组出力波动

Fig.8 Change in output of each unit

可以看出,在光照波动的场景下,光伏机组的出力曲线随光照波动而改变,而双环控制的储能机组通过改变参考值而改变恒功率输出量,风电机组无波动,上层模型使整个系统达到最小净负荷,此时下层模型中火电机组无需调整。

考虑储能SOC不足时,机组被迫下调输出功率,无法支撑系统出现的功率缺额。下层模型中火电机组动作时间略慢于储能机组,但仍能保持系统频率稳定。

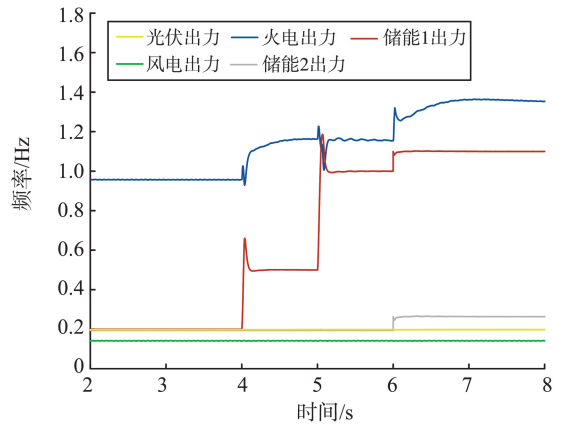
分析场景3、4。图9为机组支撑功率不足时,紧急情况下的系统响应图。

此场景下为进行快速支撑,优先考虑储能机组工作,减缓频率下跌提高频率最低点,风光机组保持不变,随后火电机组提供一次调频的功率支撑。图9(a)显示,面对负荷增加带来的功率缺口,储能机组在4 s、5 s和6 s时分别迅速提高出力,有效支撑系统频率。而在6 s后,由于储能已达到最大放电能力,火电机组接管并继续提供必要的功率支撑。最终,火电机组与储能系统的协调配合成功维持了系统的稳定。在图9(b)中,未切负荷情况下,系统频率在负荷增加后迅速下降至49.3 Hz以下,而切负荷措施启动后,系统频率得到有效恢复,表明在紧急情况下切负荷策略对于系统稳定的重要性。

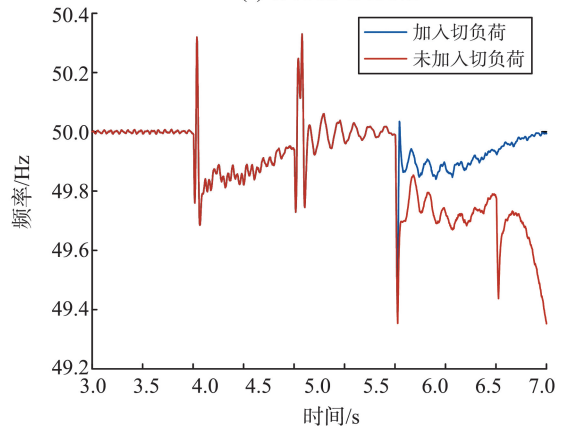
其中,储能机组1的SOC较高,三次波动均能迅速提高功率支撑。储能机组2处于第三类状态,仅在系统功率支撑不足时,在保证供电时间的基础上提高功率支撑,验证了方案的有效性。火电受限于响应速度,略慢于储能之后参与功率支撑。6 s时面对负荷再次增加,两类储能由于已达到最大放电功率无法再提高功率支撑量,此时监测到频率低于

49.5 Hz,进行切负荷措施,火电机组随后进行功率支撑。

考虑机组整体最大输出功率无法支撑功率缺额的场景,切负荷这一控制措施对系统稳定至关重要。从图9(b)中可以看出,计及切负荷后,原控制手段在6 s后的紧急情况下对系统的支撑能力更加稳定,体现出加入切负荷的必要性。



(a) 各机组出力变化



(b) 频率对比

图9 功率缺额下系统响应

Fig.9 System response in emergency situations

当应急直流电源支持达到上限时,系统需要进行紧急切负荷。根据本提出的储能与其他可控资源协调控制策略进行协调控制。设置不同场景,减载效果如表3所示。

表3 协调控制效果的验证

Table 3 Verification of harmonic control effect

序号	场景	控制量	稳态频率/Hz	协调控制稳态频率/Hz
a	节点 B18 负载增加 70% 节点 B24 负载增加 95% 节点 B12 负载增加 80%	$\Delta P_{dc} = 0.9327$	49.3983	49.5340
b	节点 B29 负载增加 80% 节点 B20 负载增加 95%	$\Delta P_{dc} = 2$ $P_{LS15} = 3.2$ $P_{LS16} = 0.6$	48.7135	49.5021

5 结论

由于异质新能源大规模接入,电网动态行为发生变化,控制对象和策略也需要拓展。本研究提出一种电力系统紧急状态下储能与其他可控资源协调控制策略,结果如下。

(1)以功率支撑能力为基础进行储能运行状态分类,可充分发挥储能系统响应快的特点,有效防止频率二次跌落。

(2)针对不同状态储能制定出力控制策略,在不同场景下对各可控资源实现有效协调控制。

(3)在协调控制基础上加入了切负荷与多区域间的协调控制,可有效缓解频率再次下降问题。

未来的研究应着重探索强不确定性场景对控制策略的挑战及其解决方案,提升系统在面对不确定性时的鲁棒性和适应性。

参考文献:

- [1] 张恒旭,曹永吉,张怡,等. 电力系统频率动态行为演变与分析方法需求综述[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 42-52.
ZHANG Hengxu, CAO Yongji, ZHANG Yi, et al. Review of frequency dynamic behavior evolution and analysis method requirements of power system [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(5): 42-52.
- [2] LIANG X D. Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(2): 855-866.
- [3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [4] 孙华东,王宝财,李文锋,等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [5] 张恒旭,高志民,曹永吉,等. 高比例可再生能源接入下电力系统惯量研究综述及展望[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1-13.
ZHANG Hengxu, GAO Zhimin, CAO Yongji, et al.

- Review and prospect of research on power system inertia with high penetration of renewable energy source [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(5): 1-13.
- [6] 谢小荣,贺静波,毛航银,等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [7] 郭立东,雷鸣宇,杨子龙,等. 光储微网系统多目标协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4121-4131.
GUO Lidong, LEI Mingyu, YANG Zilong, et al. Multi-objective coordinated control strategy for photovoltaic and energy-storage microgrid system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4121-4131.
- [8] 卢志刚,苗泽裕,蔡瑶. 考虑时变线阻的多储能 SOC 稳定均衡控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 127-137.
LU Zhigang, MIAO Zeyu, CAI Yao. Stable equilibrium control strategy for multi-energy storage SOC considering time-varying linear resistance [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 127-137.
- [9] 王浩,康博阳,郑征,等. 考虑电动汽车灵活储能的交直流混合微电网功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 2009-2025.
WANG Hao, KANG Boyang, ZHENG Zheng, et al. Power coordinated control strategy of AC-DC hybrid microgrid considering flexible energy storage for electric vehicles [J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 2009-2025.
- [10] 董新洲,汤涌,卜广全,等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3107-3119.
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3119.
- [11] MENG L X, ZAFAR J, KHADEM S K, et al. Fast frequency response from energy storage systems: a review of grid standards, projects and technical issues [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1566-1581.
- [12] 张怡,张恒旭,李常刚,等. 电力系统频率响应模式及其量化描述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5877-5886.
ZHANG Yi, ZHANG Hengxu, LI Changgang, et al. Power system frequency responses pattern and its

- quantitative analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5877-5886.
- [13] 寇凌峰, 张颖, 季宇, 等. 分布式储能的典型应用场景及运营模式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 177-187.
- KOU Lingfeng, ZHANG Ying, JI Yu, et al. Typical application scenario and operation mode analysis of distributed energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 177-187.
- [14] 李兆伟, 方勇杰, 李威, 等. 电化学储能应用于电网频率安全防御三道防线的探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 1-7.
- LI Zhaowei, FANG Yongjie, LI Wei, et al. Discussion on application of electrochemical energy storage in three defense lines of power grid frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 1-7.
- [15] 叶林, 王凯丰, 赖业宁, 等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 446-464.
- YE Lin, WANG Kaifeng, LAI Yening, et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 446-464.
- [16] 黄旭祥, 韩学山, 李家维, 等. 大电网储能与各类电源协同规划[J]. 分布式能源, 2019, 4(5): 67-74.
- HUANG Xuxiang, HAN Xueshan, LI Jiawei, et al. Coordinated planning of energy storage and various power sources in large power grid [J]. Distributed Energy, 2019, 4(5): 67-74.
- [17] YU H Y, ZHANG Q J, ZENG Y J, et al. A novel layered coordinated control scheme for energy storage system in isolated DC microgrid based on multi-agent system [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108564.
- [18] 席磊, 金澄心, 李彦营, 等. 基于信息松弛的多态能源协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 1-12.
- XI Lei, JIN Chengxin, LI Yanying, et al. A polymorphic energy-coordinated control strategy based on information relaxation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 1-12.
- [19] 郭慧, 汪飞, 顾永文, 等. 基于电压分层控制的直流微电网及其储能扩容单元功率协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 3117-3131.
- GUO Hui, WANG Fei, GU Yongwen, et al. Coordinated power control strategy for DC microgrid and storage expansion unit based on voltage hierarchical control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 3117-3131.
- [20] 程维杰, 颜云松, 康明才, 等. 考虑分布式电源影响的配电网源荷储分层协调控制[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 113-119.
- CHENG Weijie, YAN Yunsong, KANG Mingcai, et al. Generation-load-storage layered coordinated control of distribution network considering the influence of distributed generation [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 113-119.
- [21] 钟祖浩, 文云峰, 叶希, 等. 多类型资源协调的“双高”送端电网频率紧急控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3801-3811.
- ZHONG Zuhao, WEN Yunfeng, YE Xi, et al. Emergency frequency control strategy for double-high Sending-end grids with coordination of multiple resources [J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3801-3811.
- [22] 朱兰, 董凯旋, 唐陇军, 等. 计及同步机惯性与储能虚拟惯性价值的电能、惯性及一次调频联合优化出清模型[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7543-7555.
- ZHU Lan, DONG Kaixuan, TANG Longjun, et al. Joint optimal clearing model for electric energy, inertia and primary frequency response considering synchronous inertia and energy storage virtual inertia values [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7543-7555.
- [23] 陈亦平, 卓映君, 刘映尚, 等. 高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展与建议[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 174-183.
- CHEN Yiping, ZHUO Yingjun, LIU Yingshang, et al. Development and recommendation of fast frequency response market for power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 174-183.
- [24] 刘小龙, 李欣然, 刘志谱, 等. 基于风险量化与需求侧响应的综合能源系统储能事故备用优化利用[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1901-1913.
- LIU Xiaolong, LI Xinran, LIU Zhipu, et al. Study on the optimal utilization of integrated energy system emergency reserve based on risk quantification and demand side response [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1901-1913.
- [25] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
- LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [26] SHI Z D, WANG W S, HUANG Y H, et al. Simultaneous optimization of renewable energy and energy storage capacity with the hierarchical control [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(1): 95-104.