

基于改进粒子群算法的火储联合调频优化 储能控制策略研究

陶 鑫¹, 刘志成², 祝建飞², 印 伟¹

(1. 国家电投集团协鑫滨海发电有限公司, 江苏 盐城 224500; 2. 上海明华电力科技有限公司, 上海 200090)

摘要:为了解决火储联合调频协同控制效果与储能系统成本回收的问题,提出一种改进粒子群算法的储能优化控制策略,通过引入自适应权重调整全局搜索方向,并解决储能电荷状态与出力状态的耦合性问题,建立火储联合调频综合性能指标进行储能控制策略研究。案例仿真结果表明:本文所提算法比传统算法在收敛效果方面具有明显优越性,避免了局部最优解问题;当储能系统电荷状态设置在57.5%和42.5%时,提高了机组调频响应效果,延长了储能设备的使用寿命。

关键词:火储调频;粒子群算法;自适应;电荷状态;经济性

中图分类号:TM711 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.03.013

[引用本文格式]陶 鑫,刘志成,祝建飞,等. 基于改进粒子群算法的火储联合调频优化储能控制策略研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(3):98-104. TAO Xin, LIU Zhi-cheng, ZHU Jian-fei, et al. An optimal control strategy of thermal-energy storage frequency modulation based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3):98-104.

An Optimal Control Strategy of Thermal-energy Storage Frequency Modulation based on Improved Particle Swarm Optimization

TAO Xin¹, LIU Zhi-cheng², ZHU Jian-fei², YIN Wei¹

(1. State Power Investment Group GCL Binhai Power Generation Co., Ltd., Yancheng, China, Post Code: 224500;
2. Shanghai Minghua Electric Power Science & Technology Co., Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200090)

Abstract: In order to solve the problems of coordinated control effect of thermal-energy storage frequency modulation and the cost recovery of energy storage system, an energy storage optimization control strategy based on improved particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed. By introducing self-adaptive weight to adjust the global search direction, resolving the coupling problem between energy storage charge state and output state, the index of thermal-energy storage frequency modulation is established to study the energy storage control strategy. The result of the case simulation show that the algorithm proposed in this paper has more obvious advantages than the traditional algorithm in the effect of convergence and avoids the problem of local optimal solution. It can improve the frequency modulation response effect and prolong the service life of the energy storage equipment when the state of charge of the energy storage system is set at 57.5% and 42.5%.

Key words: thermal-energy storage frequency modulation, particle swarm optimization (PSO), self-adaptive, state of charge, economy

引言

在“双碳”目标背景下,大规模新能源并网有效降低了能源行业的碳排放,但加重了电网运行的负担^[1]。在电力系统中,频率稳定是保证电能品质的重要指标之一,而火电机组在电力系统调频中承担着重要任务。自动发电控制(Automatic generation control, AGC)可以辅助火电机组响应频率调节,但火电机组存在惯性响应现象,不能准确跟踪电网调度指令的响应状态,调频精度较低,对短时调频具有较大的局限性,且AGC频繁调节直接增加了火电机组设备的损耗,降低机组运行寿命^[2]。相较于火电机组,储能系统调频的优势更加明显,具有灵敏性、准确性、灵活性^[3],应用领域更加广泛。

针对储能参与电力系统调频的研究表明,储能系统频繁充放或过充过放的现象都会影响电池的荷电状态(State of charge, SOC),降低电池的使用寿命,增加投资成本^[4-5]。文献[6]对电池健康度进行预测,采用灰色模型算法对锂离子电池的循环寿命与电池实际容量之间的关系进行分析,但灰色模型算法没有考虑到电池容量衰减的非线性特性,与实际应用之间相差较大。文献[7]将储能系统参与电网调频情况分为5种,分别设置相应的频率响应边界,对研究储能系统参与电网调频的出力点有一定的指导作用。文献[8]研究储能系统参与AGC控制中,没有考虑到储能系统频繁调节时所产生的损耗,实际应用的经济性尚待讨论。文献[9]采用粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO)实现工期、成本、质量等多目标优化调节。采用PSO算法优化网络结构模型,可以实现对储能系统SOC进行准确估值^[10],但该算法本身存在早熟和无法判断全局最优解是否陷入局部最优解的缺点。通过引入位置方差产生速度变异和位置变异的方法解决上述问题。位置方差仍建立在局部最优解的基础之上,若该局部解影响范围较大时,无法实现全局搜索^[11]。通过随机最优近邻方法从极值粒子出发寻找全局最优解,进化方向易出现偏差,算法可靠性较低^[12]。基于此,在储能辅助电网调频的同时,研究储能系统的最佳充放电时机,提高联合机组整体响

应水平和延长储能系统的使用寿命,是急需解决的问题。

本文提出一种基于自适应权重粒子群寻优的算法,算法采用自适应权重优化全局搜索进化策略,充分考虑了储能系统电荷状态与出力状态之间的耦合性,分析火储联合调频响应控制效果。结果表明,改进后火储联合调频性能进一步得到改善,增加了机组经济效益并延长了机组的使用寿命,为火储联合调频性能优化提供参考和方向。

1 火储联合调频控制系统

1.1 调频控制方式

电力系统的频率和有功功率是火电调频主要的控制参数。火电机组通过AGC技术实现机组出力值跟踪电网需求,维持电网频率稳定,并保持有功功率的供需平衡。传统AGC控制从两个方面进行,一方面通过负荷分配器按照机组实际出力与负荷偏差进行分配调度指令,另一方面通过机组控制器响应电网调度指令^[13]。当机组控制器无法实现零偏差响应时,负荷分配器会依据偏差信息重新下发调度指令,再次进行调节,直至满足电网需求,从而形成闭环反馈控制系统。

由于新能源发电的特点具有间歇性和不稳定性,难以参与电网调频。水力发电参与调频的控制效果比较理想,但水电机组也易受到外界因素的影响,导致调频容量有限。为减轻传统火电机组调频的压力,传统火电机组逐步开始联合储能系统共同参与电网调频,形成火储联合调频的新态势,不仅提升机组调频综合性能,而且增加机组调频收益。

1.2 火储联合调频运行特点

火电机组系统惯性大,响应AGC指令速度较慢,调频精度不高,频繁参与调频会降低机组运行年限。储能系统参与调频响应速度快,能够及时响应电网调度指令。储能系统与火电机组相结合,弥补了火电机组在小幅度调节、频繁调节、折返调节方面的不足,有效增强电力系统的稳定性,同时减少了火电机组的损耗,延长机组使用寿命。虽然储能系统在参与火电机组辅助调频服务中具有很好的调节效果,但储能系统的使用寿命较短,且频繁过充过放,

加剧了储能电池的损耗^[4]。

2 考虑储能 SOC 的充放电功率优化研究

2.1 储能 SOC 与运行特性分析

目前,储能系统的投资成本无法通过配储收益实现有效疏导,这是由于储能系统建设成本高所导致的^[14]。不仅如此,在储能系统后期运行维护中,储能电池老化会导致高额的电池更换费用,而储能电池大规模更换无异于建设一座新型小型储能系统,数年运行维护成本将呈爆炸式增长^[15]。在退役储能设备收支成本不平衡的情况下,新一轮储能设备上线加重了企业的负担。

储能电池的使用寿命与充放电功率、电荷状态量等参数紧密相关。“满充满放”、“快充快放”的运行方式,虽在短期内提升了联合机组调频的相应效果,但是机组长期处于电网调度状态下,不利于联合机组平稳响应电网需求,不利于延长储能电池的使用寿命。“浅充浅放”更适用于储能系统调频,有利于延长储能电池使用寿命和提高工作效率^[16-17]。因此,本文聚焦储能系统电荷状态量与充放电功率的耦合性,设置 SOC 上下限避免“满充满放”现象,以储能系统 SOC 状态确定机组允许最大充放电功率的限值,最终实现“浅充浅放”目标,如图 1 所示。

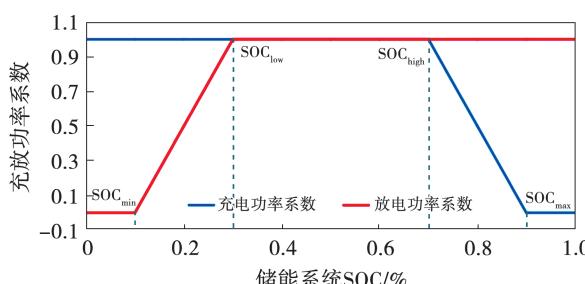


图 1 储能系统 SOC 与充放电功率系数的影响关系

Fig. 1 Relationship between SOC and charge/discharge power coefficients of energy storage system

2.1.1 约束条件

储能电荷状态量约束:

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (1)$$

式中: SOC—当前时刻储能系统电荷状态量; SOC_{min}—储能系统最小电荷状态量, 取值 0.1; SOC_{max}—储能系统最大电荷状态量, 取值 0.9。

储能充放电功率约束:

$$P_{c,bess} = \begin{cases} P_{c,max}, & SOC < SOC_{high} \\ P_{c,max} \times \frac{SOC_{max} - SOC}{SOC_{max} - SOC_{high}}, & else \\ 0, & SOC > SOC_{max} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_{d,bess} = \begin{cases} 0, & SOC < SOC_{min} \\ P_{d,max} \times \frac{SOC - SOC_{min}}{SOC_{low} - SOC_{min}}, & else \\ P_{d,max}, & SOC > SOC_{low} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{c,bess}$ —系统允许最大充电功率, MW; $P_{d,bess}$ —系统允许最大放电功率, MW; $P_{c,max}$ —系统装机额定充电功率, MW; $P_{d,max}$ —系统装机额定放电功率, MW; SOC_{high} —额定功率充电的 SOC 上限值; SOC_{low} —额定功率放电的 SOC 下限值。

2.1.2 火储联合调频出力

储能系统参与传统火电机组调频过程中, 储能系统的实际充放电功率大小在电荷状态量和最大充放电功率的约束下, 提供余量电能存储和电能缺口补充等服务, 实现联合机组总体负荷快速满足电网调度需求。

储能系统充电过程:

当火电机组的实际出力远超过电网需求时, 储能系统根据实际工况吸收多余电能进行存储。

$$P = P_{unit} - P_c \quad (4)$$

$$P_{cn} = |P_{unit} - P_{AGC} - P_{zone}| \quad (5)$$

$$P_c = \begin{cases} P_{cn}, & P_{c,bess} \geq P_{cn} \\ P_{c,bess}, & else \end{cases} \quad (6)$$

式中: P —火储联合机组调频实际功率, MW; P_{unit} —火电机组调频响应功率, MW; P_c —储能系统实际充电功率, MW; P_{AGC} —电力系统调频调度指令, MW; P_{zone} —电力系统调度指令的死区大小, MW; P_{cn} —火电机组出力值与 AGC 调节要求的响应偏差, 即实际充电需求, MW。

储能系统放电过程:

当火电机组的实际出力远低于电网需求时, 储能系统根据实际工况释放从火电机组存储的电能。

$$P = P_{unit} + P_d \quad (7)$$

$$P_{dn} = |P_{AGC} - P_{unit} - P_{zone}| \quad (8)$$

$$P_d = \begin{cases} P_{dn}, & P_{d,bess} \geq P_{dn} \\ P_{d,bess}, & else \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_d —储能系统实际放电功率,MW; P_{dn} —火电机组出力值与AGC调节要求的响应偏差,即实际放电需求,MW。

2.1.3 储能系统使用寿命

储能系统的SOC直接影响储能电池的放电量占额定装机容量的比值大小,即储能系统的放电深度(Depth of Discharge,DOD)大小,而储能电池DOD越大,则系统使用寿命越短。因此,储能系统实际运行寿命与SOC,DOD的联系十分紧密,如式(10)所示^[18]:

$$T_{\text{life}} = \frac{L_{\text{DOD}}}{l_{\text{DOD}}} \quad (10)$$

式中: T_{life} —储能系统实际运行寿命,天; L_{DOD} —储能系统在放电深度DOD下最大循环次数; l_{DOD} —储能系统在放电深度DOD下每日类循环次数。

在本文中,储能系统使用寿命优化主要通过控制SOC_{min},SOC_{max},SOC_{low}和SOC_{high}的限幅实现,即储能电池受到电荷状态量和充放电功率的约束,实现“浅充浅放”,从而避免了“满充满放”。该方法不仅满足了快速响应电力系统调频的要求,还减少了储能系统的寿命损耗。

2.2 改进PSO的算法

PSO算法模拟了自然界生物种群觅食算法行为^[18]。该算法是通过种群中随机个体之间信息共享来寻找局部最优解和全局最优解,实现对特定问题的优化。PSO算法的全局收敛性较高,广泛应用于优化寻值、模型训练、系统控制等应用领域。当面临多耦合复杂性问题,PSO算法易限于当前极值点,即局部最优^[19~20]。本文引入自适应权重改进PSO算法,进行储能充放电功率限幅调频。

2.2.1 适应度评价

为了提高火储联合调频响应控制效果,提高机组参与电力系统辅助服务补偿收益,将火储联合调频的调节速度和调节精度作为衡量储能出力值优化效果评价指标,从而形成火储联合调频综合性能指标,适应度函数选取调频综合性能指标的日均值K,如式(11)所示:

$$K = K_i \times M_i / \text{sum}(M) \quad (11)$$

$$K_i = \max\left(\frac{|P_{t+\Delta t} - P_t|}{\Delta t \times V_s} + \frac{3A_s - |P_{t+\Delta t} - P_{\text{aim}}|}{A_s}, 0\right) \quad (12)$$

式中: K_i —第*i*次调频过程综合性能指标; M_i —第*i*次调频过程调节里程,MW; M —调节里程向量,MW; t —AGC指令下发时刻,s; $t + \Delta t$ —下一条AGC指令下发时刻,s; $P_t, P_{t+\Delta t}$ — t 和 $t + \Delta t$ 时刻联合机组功率,MW; P_{aim} —当前指令目标调节功率,MW; V_s —联合机组的标准调节速率,MW/min; A_s —联合机组标准调节精度,MW。

2.2.2 自适应随机搜索

PSO迭代寻优过程中,粒子种群进化导向是全局最优粒子,以该粒子为中心进化生成新粒子种群进行迭代寻优过程。若全局最优粒子陷入某极值,而当前搜索速度和学习因子较小时,粒子种群进化无法脱离该极值领域,从而导致算法早熟,无法体现算法的优越性。本文采用一种自适应权重改进PSO粒子更新方法,该方法在PSO优化陷入局部最优值时,通过调整粒子迁移速度系数,使得新粒子位置跳出局限,从而实现全局搜索,保证算法的稳定性和可靠性。

自适应权重因子由当前迭代粒子种群的适应度均值与个体适应度共同决定。若当前粒子个体适应度函数小于当前迭代粒子种群适应度均值,则当前粒子自适应权重应越大,即适应度函数越小离最优解越远,越需要全局搜索,以实现全局最优解搜索。反之,若当前粒子个体适应度函数大于当前迭代粒子种群适应度均值,则当前粒子自适应权重应略小,即适应度函数越大离最优解越近,越需要局部搜索,以实现局部最优解搜索。此外,若当前粒子个体适应度函数等于当前迭代粒子种群适应度均值,则当前粒子自适应权重应最大,即当前粒子种群陷入局部最优解,需全局搜索以避免陷入局部最优,计算如式(13)所示:

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_{\max}, & y_i < y_{\text{ave}} \\ \omega_{\min} + \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times (y_{\max} - y_i)}{y_{\max} - y_{\min}}, & y_i \geq y_{\text{ave}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: ω_i —当前迭代第*i*个粒子的惯性因子; ω_{\max} , ω_{\min} —惯性因子取值的上、下限; y_{\max} , y_{\min} —当前迭代粒子种群中适应度函数的最优值和最劣值; y_{ave} —当前迭代粒子种群适应度函数的均值; y_i —当前迭代粒子种群中第*i*个粒子的适应度函数。

PSO进化搜索的方向和进程取决于迁移速度、

权重因子、全局最优解,根据迁移速度和加速系数在全局最优解周围随机生成 N 个新粒子组成新一代粒子群。

$$P_{i+1,j} = P_{i,j} + \Delta P_{i+1,j} \quad (14)$$

$$\Delta P_{i+1,j} = \omega V_{i,j} + c_1 \text{rand}(0,1)(P_{i,\text{best}} - P_{i,j}) + c_2 \text{rand}(0,1)(P_{g,\text{best}} - P_{i,j}) \quad (15)$$

式中: $P_{i,j}, P_{i+1,j}$ —第 i 代和第 $i+1$ 代粒子种群中第 j 个粒子位置; $\Delta P_{i+1,j}$ —在第 $i+1$ 代粒子种群中第 j 个粒子的位置变化量; $V_{i,j}$ —第 i 代粒子种群中第 j 个粒子位置迁移速度; c_1, c_2 —加速系数,取值 2; $\text{rand}(0,1)$ —区间 $[0,1]$ 上的随机数; $P_{i,\text{best}}$ —第 i 代粒子群中最优解的粒子位置; $P_{g,\text{best}}$ —整个粒子种群中最优解的粒子位置。

2.2.3 改进 PSO 算法求解过程

火储联合调频调度指令由电网下发给运行机组,调频考核指标由调节速度和调节精度构成,储能系统出力值状态直接影响机组响应电网需求的效果。在满足约束条件的同时,寻找目标函数最优解 $SOC_{\text{high}}, SOC_{\text{low}}$ 。基于自适应权重 PSO 算法求解火储联合调频性能优化问题的步骤如下:

步骤 1:根据初始化粒子种群的进化次数、规模大小、初始位置、初始速度等参数信息计算初始代粒子种群($SOC_{\text{high}}, SOC_{\text{low}}$)的目标函数,找到当前粒子种群中极值粒子位置,并记录为全局最优解;

步骤 2:根据自适应搜索算法,更新粒子迁移速度和位置信息,完成进化迭代;

步骤 3:计算当前粒子种群适应度函数,确定极值粒子;

步骤 4:对当前迭代中极值粒子的最优解与全局最优解进行比较,若局部最优解优于全局最优解,则进行更替,反之跳转步骤 5;

步骤 5:粒子种群进化代数大于设定值,则终止,否者跳转步骤 2。

3 实际案例分析

选取某电厂 1 050 MW 火电机组的 24 h 实际运行数据,采样间隔时间为 1 s,如图 2 所示。模拟配备储能系统装机容量为 15 MW/7.5 MW·h,储能系统主要承担辅助火电机组响应电网调频需求。改进后 PSO 算法中粒子群规模为 20,最大化进化 100 代,自适应权重随适应度函数变化进行浮动,求解储

能系统的电荷容量阈值最优解($SOC_{\text{high}}, SOC_{\text{low}}$)。

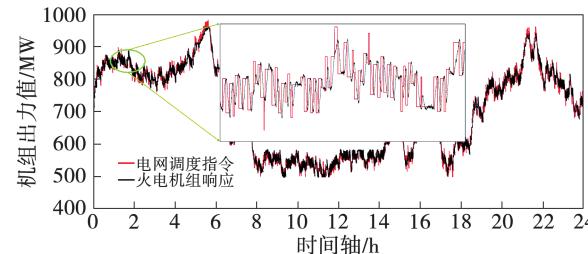


图 2 火电机组调频响应过程

Fig. 2 Frequency modulation response process of thermal power unit

通过自适应权重 PSO 寻优迭代,求解火储联合调频综合性能指标最优解,适应度进化曲线如图 3 所示。火储联合运行仿真曲线如图 4 所示。图 2 和图 4 的曲线对比表明,改进后火储联合调频响应趋势更加贴合电网调频调度指令曲线,进一步改善了调频响应效果。全局最优结果表明 $SOC_{\text{high}}, SOC_{\text{low}}$ 最佳设置点分别在 57.5% 和 42.5%,火储联合调频的日均综合调频性能指标达到最优值 4.12。储能系统和火电机组共同参与到电网调频,响应过程更加贴合电网调频调度指令。

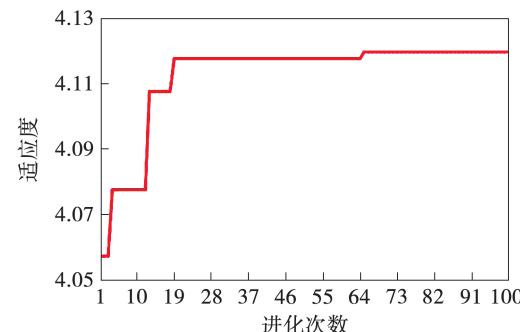


图 3 适应度函数进化曲线

Fig. 3 Fitness function evolution curve

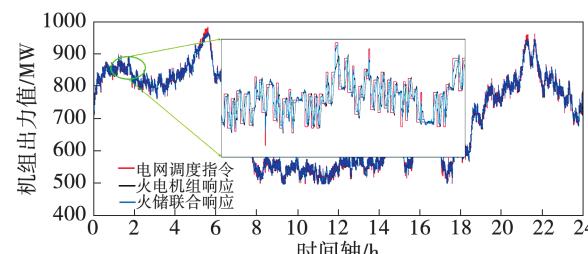


图 4 火电联合储能参与调频响应过程仿真曲线

Fig. 4 Simulation curve of thermal-energy storage in frequency modulation response process

相较于以往调频综合性能指标提高了 0.08。若一年火储联合调频运行 360 天,单次调频补偿 0.6 元/MW,日均响应电网调度以 20 000 MW 为基准,改进后储能系统每年直接增加收益 35 万元左右。不仅如此,优化前储能系统日均循环次数约 10 次,优化后储能系统日均循环次数约 9.6 次。若储能系统选取最先进技术的钛酸锂电池,循环充放电可达 2.5 万次,采用本文方法延长了储能设备使用寿命约 88 天,提高了储能系统的使用效率,有助实现储能系统的投资成本部分疏导。

4 结 论

为提高机组的调频响应控制效果,本文考虑储能系统电荷状态与出力状态的影响关系,并提出了一种自适应权重粒子群寻优算法,优化了全局搜索进化策略。

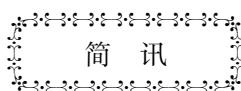
实际案例结果表明,本文所提方法收敛速度较快,收敛效果较好,克服了传统 PSO 算法易陷局部最优的缺点。同时,该方法解决了储能电荷状态与出力值的经济性问题,储能系统的最大充放电限值分别设置在 57.5% 和 42.5% 时,机组整体响应效果更加符合电网需求,不仅综合调频性能指标提高了 0.08,直接增加收益 35 万/年,而且延长了储能系统的实际使用寿命 88 天,提高了储能系统的使用效率,帮助储能系统的投资成本实现有效疏导。

参考文献:

- [1] 周婷婷,李欣然,姜学皎. 储能电源参与电网调频的需求评估方法[J]. 电力建设,2016,37(8):65–71.
ZHOU Ting-ting, LI Xin-ran, JIANG Xue-jiao. Demands assessment method of energy storage power sources in grid frequency regulation[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 65–71.
- [2] 刁云鹏,王忠言,张来星,等. 储能系统在火力发电厂联合调频中的应用[J]. 吉林电力,2020,48(5):30–32.
DIAO Yun-peng, WANG Zhong-yan, ZHANG Lai-xing, et al. Application of energy storage system in joint frequency modulation of thermal power plant [J]. Jilin Electric Power, 2020, 48 (5): 30 – 32.
- [3] 李欣然,黎淑娟,黄际元,等. 储能电池参与电网二次调频的高效性评估[J]. 太阳能学报,2019,40(9):2608–2615.
LI Xin-ran, LI Shu-juan, HUANG Ji-yuan, et al. Efficiency analysis of energy storage battery participating in secondary frequency regulation [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(9): 2608 – 2615.
- [4] 肖春梅. 电储能提升火电机组调频性能研究[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 98 – 105.
XIAO Chun-mei. Research on using electric energy storage to improve frequency regulation performance of thermal power units [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 98 – 105.
- [5] 陈虹妃,张宸宇,缪惠宇,等. 带蓄电池 SOC 反馈的虚拟同步发电机系统[J]. 电力工程技术,2018,37(4):90–96.
CHEN Hong-fei, ZHANG Chen-yu, MIAO Hui-yu, et al. Virtual synchronous generator system with battery SOC feedback control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37 (4): 90 – 96.
- [6] 牟爱政,彭博伟,张连垚,等. 储能系统应用于火电厂调频经济性评价的研究[J]. 上海电力学院学报,2019,35(5):479–485,492.
MOU Ai-zheng, PENG Bo-wei, ZHANG Lian-yao, et al. Study on application of energy storage system to economic evaluation of power plant frequency regulation [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2019, 35(5): 479 – 485, 492.
- [7] 谢志佳,李德鑫,王佳蕊,等. 储能系统参与电力系统调频应用场景及控制方法研究[J]. 热力发电,2020,49(8):117–125.
XIE Zhi-jia, LI De-xin, WANG Jia-ri, et al. Application scenarios and control method research of energy storage system participating in power system frequency modulation [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 117 – 125.
- [8] 胡泽春,谢旭,张放,等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5080–5087.
HU Ze-chun, XIE Xu, ZHANG Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5080 – 5087.
- [9] 卓锦松,陆惠民. 基于粒子群算法的工程项目多目标优化问题研究[J]. 工程管理学报,2017,31(6):101–106.
ZHUO Jin-song, LU Hui-min. A multi-objective optimization of construction projects based on particle swarm algorithm [J]. Journal of Engineering Management, 2017, 31(6): 101 – 106.
- [10] 缪家森,成丽珉,吕宏水. 基于 PSO-ELM 的储能锂电池荷电状态估算[J]. 电力工程技术,2020,39(1):165–169,199.
MIAO Jia-sen, CHENG Li-min, LYU Hong-shui. Estimation of state of charge of energy storage lithium battery based on PSO-ELM [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39 (1): 165 – 169, 199.
- [11] 鲁裕婷,赵天乐,都洪基,等. 基于改进粒子群算法的含 DG 配电网无功优化[J]. 电力工程技术,2018,37(6):69–74.
LU Yu-ting, ZHAO Tian-le, DU Hong-ji, et al. Reactive power op-

- timization of distribution network with distributed generation based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(6): 69–74.
- [12] 王向红, 钱文姝. 基于改进 PSO 算法的微电网调度方法 [J]. *电网与清洁能源*, 2017, 33(7): 53–57, 72.
WANG Xiang-hong, QIAN Wen-shu. A new scheduling method of microgrid based on improved PSO algorithm [J]. *Power System and Clean Energy*, 2017, 33(7): 53–57, 72.
- [13] 朱海峰. 自动发电控制的实现技术及其发展 [J]. *科学技术创新*, 2015(20): 14.
ZHU Hai-feng. Realization technology and development of automatic generation control [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2015(20): 14.
- [14] 樊海锋, 俞智鹏, 刘文龙, 等. 储能参与电力系统快速调频的需求评估方法 [J]. *电力工程技术*, 2019, 38(2): 18–24.
FAN Hai-feng, YU Zhi-peng, LIU Wen-long, et al. Demand assessment approach of energy storage for participating in fast frequency regulation of power system [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(2): 18–24.
- [15] 孟高军, 苏令, 孙玉坤, 等. 退役电池梯次利用的一致性管理研究综述 [J]. *电源技术*, 2021, 45(10): 1376–1379.
MENG Gao-jun, SU Ling, SUN Yu-kun, et al. Review on consistency management of echelon use of retired battery [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2021, 45(10): 1376–1379.
- [16] 李相俊, 马锐. 考虑电池组健康状态的储能系统能量管理方法 [J]. *电网技术*, 2020, 44(11): 4210–4217.
LI Xiang-jun, MA Rui. Energy management method of energy storage system considering the SOH of battery pack [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(11): 4210–4217.
- [17] 谢云云, 李虹仪, 崔红芬. 考虑电网侧储能调频能力的电力系统负荷恢复策略 [J]. *电力工程技术*, 2021, 40(6): 43–51.
XIE Yun-yun, LI Hong-yi, CUI Hong-fen. Load restoration strategy for power system considering the transient frequency control ability of energy storage system [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(6): 43–51.
- [18] 王泽爽, 陈嘉俊, 朱建全, 等. 计及循环寿命的储能优化配置与运营策略 [J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10): 75–81.
WANG Ze-shuang, CHEN Jia-jun, ZHU Jian-quan, et al. Optimal configuration and operation strategy of energy storage considering cycle life [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10): 75–81.
- [19] 万春林, 张卫. 基于改进粒子群算法的基数受限最优化问题研究 [J]. *统计与决策*, 2021, 37(20): 20–24.
WAN Chun-lin, ZHANG Wei. Research on cardinality constrained optimization problem based on improved particle swarm optimization [J]. *Statistics & Decision*, 2021, 37(20): 20–24.
- [20] 王荣, 白尚旺, 党伟超. 基于粒子群优化 BP 神经网络的软件老化预测 [J]. *太原科技大学学报*, 2021, 42(6): 469–474.
WANG Rong, BAI Shang-wang, DANG Wei-chao. Prediction of software aging trend based on particle swarm neural network [J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2021, 42(6): 469–474.

(姜雪梅 编辑)



欧盟项目致力于释放黑海 166 GW 浮动风电潜能

据官网报道,欧洲16个合作伙伴组成的财团共同投资2 100万欧元(2 300万美元),将在黑海保加利亚海岸建造一个5 MW的浮动风力技术演示机,计划该项目将持续五年。

罗马尼亚海上服务运营公司GSP offshore将在其位于康斯坦察的造船厂生产该装置。建成以后,装置将连接保加利亚石油和天然气公司Petroceltic运营的现有天然气平台。

演示机将使用法国工程公司Eolink独特的海上浮动风力机设计,该设计使用四个钢桅杆代替一个钢桅杆来降低涡轮机的应力。该风力机提供了更具竞争力的重量-能量比,使整体结构轻了30%以上。该装置将被设计成在黑海以最高效率运行,包括采用更大的转子,以便在低风地区产生更多能量。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.powerengineeringint.com>)