

基于多时空尺度协调的多源互补发电场群优化调度

刘德顺¹, 董海鹰^{1,2}, 汪宁渤³, 马明³

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学新能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省电力公司风电技术中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了解决风光发电随机性和不确定性造成的严重弃风、弃光问题, 在研究抽水蓄能电站、高载能负荷运行特性和消纳弃风弃光能力的基础上, 提出了基于多时空尺度协调的多源互补发电场群优化调度策略。该策略将多源互补发电场群从时间和空间的角度各分三层进行控制, 以系统运行成本最小、风光蓄发电利用率最大和系统输出功率波动最小为目标分别建立了日前、滚动、实时3个时间尺度的优化调度模型。通过滚动修正、实时调节来逐级降低风光预测误差及负荷不确定对调度计划的影响, 提高调度精度。结合甘肃酒泉具体算例, 验证了所提调度策略能够有效提高系统运行经济性, 促进风光消纳。

关键词: 发电场群; 抽水蓄能电站; 高载能负荷; 多时空尺度; 多源互补

Optimization scheduling for multi-source complementary power plants group based on multiple temporal and spatial scales coordination

LIU Deshun¹, DONG Haiying^{1,2}, WANG Ningbo³, MA Ming³

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. Wind Power Technology Center of Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to solve the problems of serious wind and solar power curtailment caused by the randomness and uncertainty of wind and solar power generation. Based on the study of pumped storage power station, high load-energy load operation characteristics and the ability to eliminate wind and solar power curtailment, this paper proposes an optimization scheduling method for multi-source complementary power plants group based on multiple temporal and spatial scales coordination. This strategy controls the multi-source complementary power generation group in three layers from the perspective of time and space, respectively. In this strategy, the multi-source complementary power plants group is controlled in three layers from the perspective of time and space, respectively. From three time scales, i.e., day-ahead, rolling and real-time, the optimal scheduling models are established with the goal of the minimum operating cost, the maximum utilization of wind and solar power storage and the minimum fluctuation of output power. Through rolling correction and real-time adjustment, the wind-solar forecasting error and the influence of load uncertainty on the scheduling plan are reduced stepwise to improve the scheduling accuracy. Combining with the specific example of Jiuquan, Gansu, it is verified that the proposed scheduling strategy can improve the economics of system operation effectively and promote the consumption of wind and solar.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61663019).

Key words: power plants group; pumped storage power station; high load-energy load; multiple temporal and spatial scales; multi-source complementation

0 引言

近年来, 我国可再生能源发电以每年 40%以上

的增长速度持续上升, 在电网中的重要性也日益提升, 即将进入可再生能源大规模发展阶段。以风光发电为代表的新能源电力具有可持续、清洁无污染等优点, 同时风光发电也具有间歇性强、可控性差、波动性大等缺点, 影响着电力系统的正常运行。随着“三北地区”风光联合发电大规模并网运行, 由于发电基地一般远离电力负荷中心, 调节性电源和

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61663019); 甘肃省重大专项资助(17ZD2GA010); 国网甘肃省电力公司科技项目资助(52272716000K)

需求侧响应资源匮乏,使得就地消纳能力、调峰能力和系统稳定能力差等问题大大制约了大规模风、光发电消纳。同时导致了愈加严重的弃风弃光现象,尤其是“三北地区”,2017年前三季度,全国风光发电总量2985亿kWh,弃风量和弃光量总和约为346.5亿kWh,弃风弃光量占到了风光总发电量的12%;其中风光资源丰富的甘肃、内蒙古、新疆三省发电总量分别为190亿kWh、463亿kWh、329亿kWh,弃风弃光电量分别为81.5亿kWh、62.2亿kWh、124.9亿kWh,弃风弃光率达43%、13%、38%,远高于全国平均水平^[1]。

为了全额接纳风力发电和光伏发电入网,应用多种能源发电形式共存的方法已经成为一种必然的发展趋势^[2]。多源互补策略是解决高比例新能源发电可控性差最好的方式,再将多源互补策略与抽水蓄能、蓄电池储能、超级电容器储能等技术相结合已得到广泛的应用^[3-5],其通过先进的调控手段,发挥各自的特点,优势互补,实现多源互补发电场群联合系统的优化运行,达到平抑新能源发电随机波动和减小大规模新能源接入电网影响的效果。

目前,国内外针对多源互补联合发电运行方式进行了大量的研究。文献[6-8]提高了风、光联合发电系统预测出力的精确性,减小了发电出力的误差,但是模型求解计算量太过庞大;文献[9]针对风水火发电系统,提出了一种新的合作方式,对常规机组和抽蓄机组承担的作用进行区分,建立风、水、火联合机组组合模型,起到提高消纳新能源能力的效果;文献[10-12]将风电场和光伏电站与其他电源相结合,整合后一起接入电网,利用多种能源之间互补的特性实现提高电网供电质量的目的;文献[13]将风电、抽水蓄能和蓄电池相结合,建立了抽水蓄能和蓄电池的混合系统数学模型,并评估了三种场景下系统的运行效果。文献[14]在研究了风电场和水电站联合发电系统经济性的基础上,增加数学模型中的功率约束条件,从而平抑了风电场功率输出的波动。文献[15]研究了风电场在出力不稳定的形势下,抽蓄电站机组容量的选取对系统的影响。文献[16]以运行成本、污染气体排放量和总消耗燃料量最小为目标函数,建立了风电场、抽水蓄能电站的联合优化调度模型,从而解决了由于系统出力随机性和波动性带来的影响。文献[17]研究了抽水蓄能电站和风电场联合发电的优化方法,建立了一个多时间尺度的混合整数规划模型,以系统联合效益最大为目标,减少了出力波动性对电网运行产生的负面影响。文献[18]提出风光蓄多能互补输电调度策略,以多能互补联合出力最大、负荷跟踪误差最

小为目标建立模型,解决了联合发电系统出力波动性强、负荷波动性大的问题,提高了新能源发电利用率。

针对多时间尺度方法在电网调度领域中的应用。文献[19]提出了一种基于增量表达式改进了的滚动调度模型,从而来解决滚动计划与日前计划之间偏差大等问题。文献[20]为降低用电负荷和风力发电功率预测偏差,建立了以风力发电机组运行成本和发电弃风量最小为目标函数的联合系统优化调度模型。文献[21]提出了年、周、日3个时间尺度的滚动优化调度策略,结合实时预测数据以及各个机组在实际情况中完成的电量,通过更改原有各个机组的运行计划,从而提高机组运行的精度,减小预测误差对系统调度的影响。现有文献多是针对多种发电电源之间联合调度的研究以及单一发电电源在多时间尺度优化调度控制的研究^[22-26],对已有高比例新能源与火力发电的装机容量、多时间尺度的多源协调互补问题的研究较少,将多源协调互补系统与高载能负荷相结合的发电场群的研究,在多时间尺度联合调度方面研究更少。

为了大规模消纳新能源、减少弃风弃光,同时解决发电负荷和用电负荷不稳定给电网的安全稳定运行带来的影响,本文首先根据抽水蓄能电站和高载能负荷的运行特性,分析了两者的消纳弃风弃光的能力,然后从时间和空间的角度出发提出了基于多时空尺度协调的多源互补发电场群优化调度策略。该调度策略在风光发电、火力发电基础上综合考虑抽水蓄能电站和高载能负荷的调节特性,将多源互补发电场群从时间和空间的角度各分三层进行控制,以系统发电成本最小、风光蓄联合发电利用率最大和系统输出功率波动最小为目标分别建立了日前、滚动、实时3个时间尺度的优化调度模型。通过滚动修正、实时调节来逐级降低风光波动性和预测误差对调度计划的影响,提高调度精度,随后用CPLEX软件进行优化求解,算例证明该策略可以有效地提高风光发电消纳水平,提高系统运行经济性和安全性,减少弃风弃光。

1 抽水蓄能电站与高载能负荷出力特性

1.1 抽水蓄能出力特性

抽水蓄能电站作为当前电力系统调节调度的主要工具,具有在电力负荷低谷时蓄电、电力负荷高峰期发电、调频调相等方面的特点,其机组响应速度较快,并且能够在短时间内完成启停和工况转换,优良的变负荷能力和灵活的调节方式在平抑新能源

发电波动、削峰填谷等方面具有一定的优越性。近十年来, 抽水蓄能电站作为当今经济性最强的大规模储能设施, 提高了电网消纳新能源的能力, 也保障了电网的运行安全。同时我国也大力发展抽水蓄能电站, 在运行管理方面已达到较高水平, 并且取得了很大的成绩。

1.2 高载能负荷调节特性

高载能负荷企业具有负载功率大, 布局相对集中, 负荷可中断、可平移, 调节速度快的特点, 响应速度可达毫秒级。我国高载能负荷企业用电量可达总用电量的 30% 以上, 所以高载能负荷非常适用于消纳新能源发电负荷, 参与电力系统的调峰。高载能负荷企业的日内典型功率调节特性曲线图如图 1 所示。

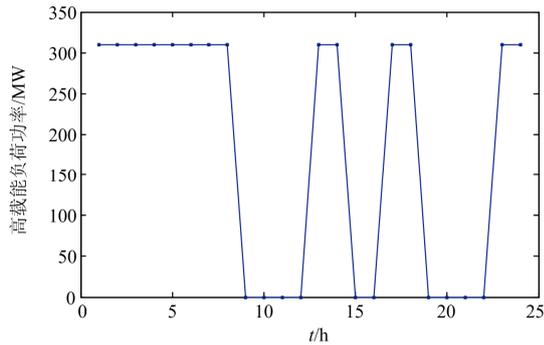


图 1 高载能负荷企业的日内典型功率调节特性

Fig. 1 Day-typical power regulation characteristics of high-load energy companies

2 多时空尺度的多源互补发电场群优化调度策略

2.1 多源互补发电场群联合运行策略

策略在风电场群、光伏电站场群和火电站的联合发电系统的基础上配备抽水蓄能电站和高载能负荷。当用电负荷不能消纳风光发电时, 利用抽水蓄能电站和高载能负荷对风光发电出力过剩进行继续消纳; 当风光发电对用电负荷供应不足时, 利用火电站和抽水蓄能电站进行负荷的填补。这样可以实现多源互补、平抑风光发电的随机波动, 提高风光发电的消纳水平和系统运行的安全性, 减少弃风弃光的现象, 其多源互补发电场群联合运行原理图如图 2 所示。

图 2 中: P_{Wt} 为风电场输出功率; P_{Vt} 为光伏电站输出功率; P_{Tt} 为火电站输出功率; P_{Ht} 为抽水蓄能电站输出功率; P_{Gt} 为高载能负荷输入功率。

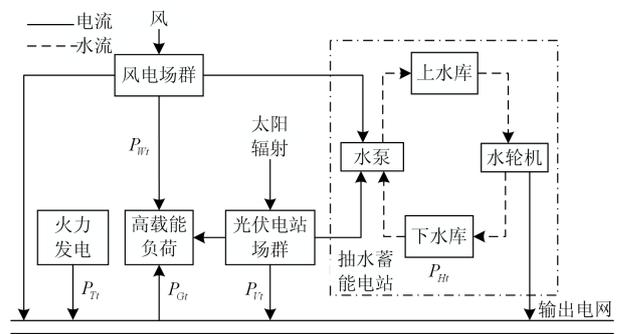


图 2 多源互补发电场群联合运行原理图

Fig. 2 Multi-source complementary power generation field cluster joint operation schematic diagram

2.2 多空间尺度联合调度策略

多源互补发电场群优化调度总体架构从空间角度上由系统层、联盟层和本地层这 3 个控制层组成, 由系统层的电网调度中心通过接收 3 个区域 Agent 的协调请求信号, 向 3 个区域 Agent 发送指令信号; 联盟层的 3 个区域 Agent 分别通过接收本地层 M 个风电场、 N 个光伏电站、火电站、抽水蓄能和高载能企业的测量数据, 向各个发电场群发送指令信号, 从空间角度实现多源互补协调控制、充分利用风光发电场群新能源的资源, 减少弃风弃光。多源互补发电场群优化调度总体框架图如图 3 所示。

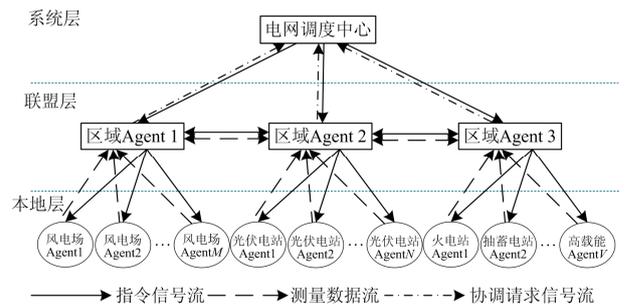


图 3 多源互补发电场群优化调度总体框架

Fig. 3 Overall framework of multi-source complementary power generation field cluster optimized scheduling

2.3 多时间尺度联合调度策略

该策略提出在风电场群、光伏电站场群、火电站、抽水蓄能电站和高载能负荷联合出力基础上, 从时间角度采用日前计划、滚动计划和实时计划的多个时间尺度联合发电系统调度策略^[28], 达到消纳新能源发电, 减少弃风弃光的效果。多个时间尺度的联合发电系统调度策略流程图如图 4 所示。

由图 4 可以看出: 该调度策略是由日前计划、滚动计划、实时计划三部分组成。调度计划每 24 h 更新一次, 以 15 min 为一个调度时段, 日前计划在第一天结束前根据已知短期预测的信息制定第二天

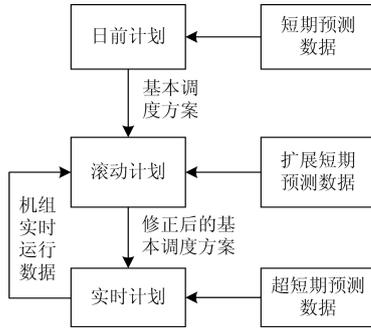


图4 多个时间尺度的联合发电系统调度策略流程图
Fig. 4 Multi-time scale power generation united system scheduling strategy flow chart

共 96 时段的调度计划；滚动计划每 4 h 滚动更新一次，在前 4 h 结束之前的最后一时段内，根据已知扩展短期预测信息滚动地修正日内剩余发电计划，制定出与当天负荷误差较小的剩余所有时段的调度计划；实时计划每 15 min 更新一次，在上一调度时段结束前根据已知超短期预测信息实时进行修改从而获得与实际负荷误差最小的下一时段调度计划。调度策略包含着从小时级到分钟级的日前计划、滚动计划和实时计划这 3 个时间尺度，随着时间尺度的缩短调度计划不断更新、修正，最终制定出与实际负荷匹配度更高的调度计划，从而提高消纳弃风弃光的能力。多个时间尺度的时长调度计划图如图 5 所示。

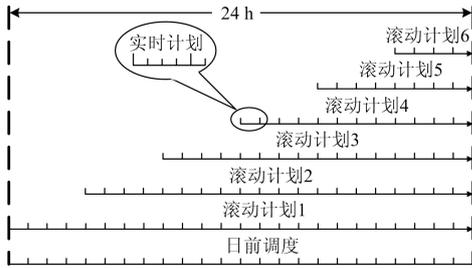


图5 多个时间尺度的时长调度计划图
Fig. 5 Multi-time scale scheduling plan

3 多时空尺度多源互补发电场群调度模型

3.1 多源互补发电场群日前计划调度模型

本策略提出的风光水火及高载能负荷多源互补发电场群联合调度策略，是通过充分发挥风光水火各个电站协同高载能负荷企业多源互补的调节能力，在满足系统运行的约束条件之下进行协调调度，平滑广义负荷的波动，从而达到系统联合发电运行成本最小、风电场、光伏电站、抽水蓄能电站联合出力及经济性最大的效果。

1) 目标函数

以系统运行成本最小为目标函数，如式(1)。

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_T} U_{it} [f(P_{T-it}) + S_{it}(1 - U_{i(t-1)}) + C_{it}(R_{it}^u, R_{it}^d)] + \sum_{k=1}^{N_H} (S_{kt}^{\text{gen}} + S_{kt}^{\text{pum}}) + \sum_{j=1}^{N_G} f(P_{G-jt}) \right\} \quad (1)$$

式中： U_{it} 为火电机组 i 在 t 时段的启停情况， $U_{it}=0$ 表示火电机组 i 在 t 时段停机， $U_{it}=1$ 表示火电机组 i 在 t 时段运行； $f(P_{T-it})$ 为火电机组 i 在 t 时段的发电成本， P_{T-it} 为火电机组 i 在 t 时段的出力； S_{it} 表示火电机组 i 的启动成本； $C_{it}(R_{it}^u, R_{it}^d)$ 为火电机组 i 的备用成本， R_{it}^u 、 R_{it}^d 分别表示火电机组 i 在 t 时段的正、负旋转备用； S_{kt}^{gen} 、 S_{kt}^{pum} 分别为抽蓄机组 k 在 t 时段的发电工况启动成本和抽水工况启动成本； $f(P_{G-jt})$ 为高载能负荷 j 在 t 时段的投切成本； T 为一个调度周期的时段数； N_T 为火电机组总数； N_H 为抽蓄机组总数； N_G 为高载能负荷的投切组数。

火电机组运行成本方程为

$$f(P_{T-it}) = a_i P_{T-it}^2 + b_i P_{T-it} + c_i \quad (2)$$

式中， a_i 、 b_i 、 c_i 为火电机组的运行成本相关系数。

机组备用成本方程为

$$C_{it}(R_{it}^u, R_{it}^d) = k_{it}^u R_{it}^u + k_{it}^d R_{it}^d \quad (3)$$

式中， k_{it}^u 、 k_{it}^d 分别为正、负备用成本。

抽水蓄能机组发电工况和抽水工况启动成本方程为

$$\begin{cases} S_{kt}^{\text{gen}} = S_k^{\text{gen}} I_{kt}^{\text{gen}} (I_{kt}^{\text{gen}} - I_{k(t-1)}^{\text{gen}}) \\ S_{kt}^{\text{pum}} = S_k^{\text{pum}} I_{kt}^{\text{pum}} (I_{kt}^{\text{pum}} - I_{k(t-1)}^{\text{pum}}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： S_k^{gen} 为抽蓄机组 k 发电工况的启动成本； S_k^{pum} 为抽蓄机组 k 抽水工况的启动成本； $I_{kt}^{\text{gen}}=1$ 表示抽水蓄能机组 k 在 t 时段是发电状况， $I_{kt}^{\text{pum}}=1$ 表示抽水蓄能机组 k 在 t 时段是抽水状况。

高载能负荷投切成本方程为

$$f(P_{G-jt}) = (U_{jt} - U_{j(t-1)}) P_j \lambda_j \Delta T \quad (5)$$

式中： U_{jt} 为高载能负荷 j 在 t 时段的投切状况， $U_{jt}=0$ 表示高载能负荷中断， $U_{jt}=1$ 表示高载能负荷运行； P_j 为高载能负荷 j 的单位投切容量； λ_j 为高载能负荷 j 的单位调节成本。

2) 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{x=1}^{N_W} P_{W-xt} + \sum_{y=1}^{N_V} P_{V-yt} + \sum_{i=1}^{N_T} P_{T-it} + \sum_{k=1}^{N_H} P_{H-kt} = \sum_{j=1}^{N_G} P_{G-jt} + P_{L_t} \quad (6)$$

式中: P_{W-xt} 为风电机组 x 在时间 t 的输出值; P_{V-yt} 为光伏发电机组 y 在时间 t 的输出值; P_{T-it} 为火电机组 i 在 t 时刻的输出值; P_{H-kt} 为抽蓄机组 k 在时间 t 的输出值, $P_{H-kt} > 0$ 表示抽水蓄能机组为发电状态, $P_{H-kt} < 0$ 表示抽水蓄能机组为蓄电状态; P_{G-jt} 为高载能负荷在 t 时刻所消耗的电功率; P_{L_t} 为普通用电负荷在 t 时刻所消耗的电功率; N_W 为风电机组总数; N_V 为光电机组总数。

(2) 火电机组出力上、下限约束

$$U_{it} P_{i-\min} \leq P_{T-it} \leq U_{it} P_{i-\max} \quad (7)$$

式中, $P_{i-\max}$ 、 $P_{i-\min}$ 分别为火电机组 i 的出力上下限。

(3) 火电机组爬坡约束

$$D_i \leq P_{it} - P_{i(t-1)} \leq U_i \quad (8)$$

式中: D_i 、 U_i 分别为机组 i 的上升、下降速率。

(4) 火电机组出力的最小开机、停机约束

$$\begin{cases} T_{it}^{\text{on}} \geq T_{i\min}^{\text{on}} \\ T_{it}^{\text{off}} \geq T_{i\min}^{\text{off}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_{it}^{on} 为火电机组 i 的累积开机时长; T_{it}^{off} 为火电机组 i 的累积停机时长; $T_{i\min}^{\text{on}}$ 为火电机组 i 的最小开机时间; $T_{i\min}^{\text{off}}$ 为火电机组 i 的最小关机时间。

(5) 抽水蓄能库容约束

$$\begin{cases} V_{\min}^u \leq V_t^u \leq V_{\max}^u \\ V_{\min}^d \leq V_t^d \leq V_{\max}^d \end{cases} \quad (10)$$

式中: V_{\max}^u 和 V_{\min}^u 分别为上水库的最大、最小容量; V_{\max}^d 和 V_{\min}^d 分别为下水库的最大、最小容量。

(6) 抽水蓄能功率约束

$$P_{Ht-\min} \leq P_{Ht} \leq P_{Ht-\max} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_{Ht-\min} = \max[-P_{Wt}, -P_{Ht-\min}, -V_t^d / (\Delta t \eta_2)] \\ P_{Ht-\max} = \min[P_{Ht-\max}, V_t^u / (\Delta t \eta_1)] \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{Ht-\min}$ 为该机组在抽水状态下出力的最大值; $P_{Ht-\max}$ 为该机组在发电状态下出力的最大值。

(7) 旋转备用约束

为应对高比例新能源发电在并网情况下功率发生波动, 系统需要增加部分的旋转备用。当联合系

统发电总产量最小时, 规定正的旋转备用约束; 当联合系统发电总产量最大时, 规定负的旋转备用约束, 如式(13)。

$$\begin{cases} R_{it}^u \leq \sum_{i=1}^N U_{it} (P_{i-\max} - P_{it}) + (P_{Wt-\max} - P_{Wt}) + (P_{Ht-\max} - P_{Ht}) \\ R_{it}^d \leq \sum_{i=1}^N U_{it} (P_{it} - P_{i-\min}) + (P_{Ht} - P_{Ht-\min}) \end{cases} \quad (13)$$

式中: R_{it}^u 为系统在第 t 时刻对正的旋转备用的需求值; R_{it}^d 为系统在第 t 时刻对负的旋转备用的需求值; P_{Wt} 为 t 时刻风力发电的出力值; $P_{Wt-\max}$ 为风力发电出力的最大值; $P_{Ht-\max}$ 为 t 时刻抽蓄机组的最大输出值; $P_{Ht-\min}$ 为 t 时刻抽蓄机组的最小输出值。

(8) 高载能负荷投入容量约束

$$P_{Gt-\min} \leq \sum_{j=1}^{N_G} S_{G-jt} P_{G-jt} \leq P_{Gt-\max} \quad (14)$$

式中: $P_{Gt-\max}$ 为高载能负荷第 t 时段投入容量的上限值; $P_{Gt-\min}$ 为高载能负荷第 t 时段投入容量的下限值; S_{G-jt} 为 j 在 t 时段的投切状态, $S_{G-jt} = 0$ 表示高载能负荷 j 在 t 时段中断, $S_{G-jt} = 1$ 表示高载能负荷 j 在 t 时段运行; P_{G-jt} 为高载能负荷 j 的单位投切容量。

(9) 高载能负荷投切次数约束

$$-M_{G-jt} \leq \sum_{t=1}^T (S_{G-jt} - S_{G-j(t-1)}) \leq M_{G-jt} \quad (15)$$

式中, M_{G-jt} 为多源互补联合系统中高载能负荷 j 在第 t 时刻投切次数的最大值。

(10) 高载能负荷投切时间约束

$$\begin{cases} (S_{G-j(t-1)} - S_{G-jt})(T_{G-jt}^{\text{on}} - T_{Gj-\min}^{\text{on}}) \geq 0 \\ (S_{G-jt} - S_{G-j(t-1)})(T_{G-jt}^{\text{off}} - T_{Gj-\min}^{\text{off}}) \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: T_{G-jt}^{on} 是多源互补联合系统中高载能负荷 j 在第 t 时间段内所有投入的时间总和; T_{G-jt}^{off} 是多源互补联合系统中高载能负荷 j 在第 t 时间段内所有中断的时间总和; $T_{Gj-\min}^{\text{on}}$ 为高载能负荷 j 投入连续时间段的最小值; $T_{Gj-\min}^{\text{off}}$ 为高载能负荷 j 中断连续时间段的最小值。

3.2 多源互补发电场群滚动计划调度模型

1) 目标函数

以风电场群、光伏电站场群以及抽水蓄能电站的多源互补发电场群联合系统出力最大为目标函数。

$$\max F_2 = \sum_{t=1}^R (P_{Wt} + P_{Vt} + P_{Ht}) \quad (17)$$

式中: P_{Wt} 为风电实际出力; P_{Vt} 为光电实际出力; P_{Ht} 为抽水蓄能实际出力; R 为滚动计划调度时段。

2) 约束条件

该策略中滚动计划的约束条件与日前计划的约束条件相同, 有火电机组相关约束、抽水蓄能机组相关约束以及高载能负荷机组相关约束等, 具体如式(6)—式(16)。为了滚动计划可以更好地修改日前计划, 滚动计划约束又添加了与日前计划机组出力的偏差约束, 如式(18)所示。

$$-mP_{\max} \leq P_{Rt} - P_{Dt} \leq mP_{\max} \quad (18)$$

式中: P_{Rt} 为 t 时刻滚动计划各发电机组的出力; P_{Dt} 为 t 时刻日前计划相应发电机组的出力; m 为约束乘子; P_{\max} 为各机组功率输出上限。

3.3 多源互补发电场群实时计划调度模型

1) 目标函数

以风光水火及高载能负荷的多源互补发电场群联合系统输出功率波动最小为目标函数, 如式(19)。

$$\min F_3 = \frac{1}{S} \sum_{t=1}^S (p_{glt} - p_{glt-av})^2 \quad (19)$$

式中: P_{glt} 为第 t 时刻多源互补发电场群联合系统输出功率的波动值; P_{glt-av} 为 S 时段多源互补联合系统输出功率波动的平均值; S 为实时计划调度时间段。系统输出功率波动值为

$$P_{glt} = P_{Lt} + P_{Gt} - P_{Wt} - P_{Vt} - P_{Ht} - P_{Tt} \quad (20)$$

式中: P_{Lt} 为第 t 时刻多源互补联合系统普通用电负荷所使用的功率值。

系统 S 时段输出功率波动平均值为

$$p_{glt-av} = \frac{1}{S} \sum_{t=1}^S p_{glt} \quad (21)$$

2) 约束条件

该策略中实时计划的约束条件与日前计划的约束条件相同, 有火电机组相关约束、抽水蓄能机组相关约束以及高载能负荷机组相关约束等, 具体如式(6)—式(16)。为了实时计划可以更好地修改滚动计划, 实时计划约束又添加了与滚动计划机组出力的偏差约束, 如式(22)所示。

$$-nP_{\max} \leq P_{St} - P_{Rt} \leq nP_{\max} \quad (22)$$

式中: P_{St} 为第 t 时刻多源互补联合系统实时计划的各发电机组出力值; n 为约束乘子。

4 求解方法

针对本文建立的是一个复杂的多目标多时间尺

度的优化问题, 具有高维数、多约束的特点, 本文采用加权尺度法来进行多目标决策, 假设系统运行者对不同目标持相同的偏好程度, 故权重系数取 $K=[0.3,0.3,0.3]$, 在 GAMS 平台上调用高效的商用软件包 CPLEX 对此优化问题求最优解。具体实现过程如下。

Step1: 问题的预处理。设置求解精度和可行解检验方法等。

Step2: 将代表机组状态的 0-1 离散变量松弛化, 然后求解此松弛问题。若无可行解则继续搜索新的节点; 若可行时, 判断是否满足切割方程, 若不满足, 则要重新求解。将求得满足方程的最优解作为新的下界值。

Step3: 求解整数变量问题。将已求松弛最优解作为整数分割寻优的初始点, 若整数条件不可行, 则返回 Step2 继续求解, 若条件满足, 则根据目标函数修改问题上界值。

Step4: 判断收敛条件。若松弛最优解和整数最优可行解满足收敛条件, 计算结束; 若不满足则返回 Step2 继续搜索, 直到找到满足要求的解。

5 算例分析

5.1 基本数据与参数

为验证本文所提基于多时间尺度并计及高载能负荷的多源互补优化调度策略消纳弃风弃光现象的有效性, 本策略特以甘肃酒泉新能源基地的风电场群、光伏电站场群加上火电站、抽水蓄能电站和高载能负荷为例进行仿真分析。采用 5 个火电机组, 4 个总装机容量为 2 000 MW 的风电场群、4 个总装机容量为 1 600 MW 的光伏电站场群、1 个额定抽发容量取为 250 MW 的抽水蓄能电站、1 个高载能负荷进行仿真分析。火电机组 1 最大出力为 455 MW, 机组 2 最大出力为 130 MW, 机组 3 最大出力为 85 MW, 机组 4 最大出力为 80 MW, 机组 5 最大出力为 55 MW; 火电机组最小出力是机组 1 最小出力为 150 MW, 机组 2 最小出力为 20 MW, 机组 3 最小出力为 25 MW, 机组 4 最小出力为 20 MW, 机组 5 最小出力为 10 MW。负荷预测值参见文献[28], 其中表 1、表 2 分别为光伏电站场群、风电场群出力预测值, 表 3 为火电机组参数值。

5.2 计算结果分析

风光发电场群出力及负荷曲线如图 6 所示。

由图 6 可以看出: 风电场群和光伏电站场群联合出力的峰谷差明显减小, 波动被有效地平抑, 联合出力后, 风电场有效地弥补了光伏电站在 1—7 时段和 20—24 时段中出力不足的缺点; 同时, 风电场

表 1 光伏电站场群出力预测

Table 1 Outputs prediction of photovoltaic power cluster

时段	光伏电场 1/ MW	光伏电场 2/ MW	光伏电场 3/ MW	光伏电场 4/ MW
7	0	5.5	8.5	3.5
8	15	25	15	30
9	20	65	85	125
10	35	100	165	175
11	75	115	260	245
12	235	125	315	335
13	310	115	300	320
14	215	110	255	275
15	305	80	275	285
16	285	50	185	155
17	175	25	105	85
18	150	5	70	65
19	30	0	30	10

表 2 风电场群出力预测

Table 2 Outputs prediction of wind power cluster

时段	风电场 1/ MW	风电场 2/ MW	风电场 3/ MW	风电场 4/ MW
1	165	190	420	210
2	145	300	370	185
3	120	330	360	255
4	160	360	305	265
5	140	350	335	310
6	120	370	250	295
7	130	440	170	205
8	80	460	185	180
9	35	350	120	155
10	10	250	80	130
11	75	420	55	175
12	85	380	130	85
13	50	390	195	30
14	115	340	120	5
15	120	320	155	65
16	170	120	125	150
17	150	10	180	125
18	195	40	140	185
19	140	50	50	210
20	240	20	85	185
21	140	5	15	150
22	70	250	5	95
23	10	350	50	30
24	80	240	40	60

表 3 火电机组参数

Table 3 Generator unit data

编号	最大出力/MW	最小出力/MW	爬坡速率/MWh	最小运行时间/h	最小运停时间/h
1	455	150	16.19	8	8
2	130	20	16.60	5	5
3	85	25	27.74	3	3
4	80	20	22.26	3	3
5	55	10	27.27	1	1

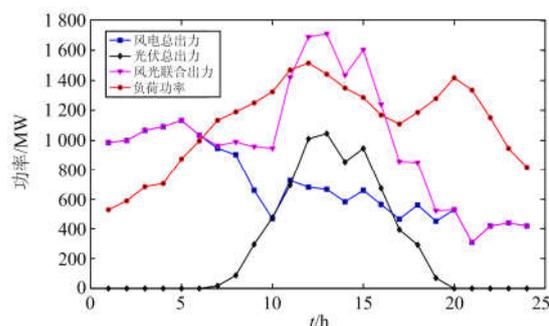


图 6 负荷及风光发电厂群联合出力

Fig. 6 Outputs prediction of loads, wind and photovoltaic power cluster

在 8—10 时段突然减小, 而光伏电站在此时刻快速增加出力, 联合出力后光伏电站抵消了风电因突然减小而引起的波动。这都说明风光联合出力具有互补的优势, 可以有效地降低单一发电对象出力的波动性, 保障电网运行的安全, 减少弃风弃光。

为验证多时空尺度协调的多源互补发电场群优化调度策略的有效性, 算例给出不同场景如下。

场景 1(Scenes1): 只含有风电场、光伏电站及火电站, 不含抽水蓄能电站和高载能负荷, 系统由火电机组对风电场和光伏电站联合发电并网进行调峰, 达到负荷供电要求;

场景 2(Scenes2): 含有风电场、光伏电站、火电站及抽水蓄能电站, 系统由火电机组和抽水蓄能机组协调运行, 从而达到对负荷供电的要求;

场景 3(Scenes 3): 含有风电场、光伏电站、火电站, 抽水蓄能电站和高载能负荷, 系统由火电机组、抽水蓄能机组和高载能负荷机组协调运行, 对风电场和光伏电站光联合发电并网进行削峰填谷、联合供电, 从而满足对负荷功率要求。

3 个场景在同一风电场、光伏电站出力情况下联合优化调度火电站、抽水蓄能电站、高载能负荷各个机组出力情况如图 7—图 9 所示。

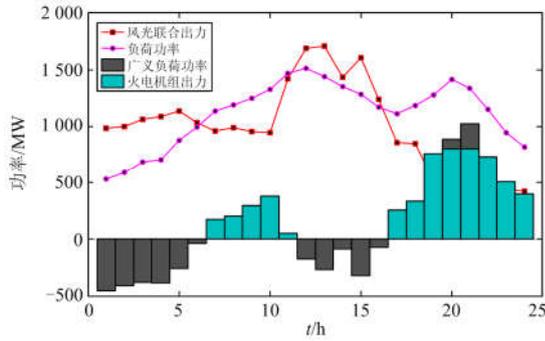


图 7 场景 1 火电机组实时出力

Fig. 7 Real time output of scenes 1 thermal power unit

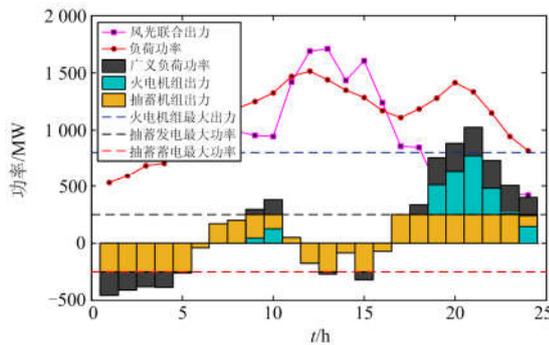


图 8 场景 2 火电与抽蓄机组实时出力

Fig. 8 Real-time output of scenes 2 thermal power and pumped storage unit

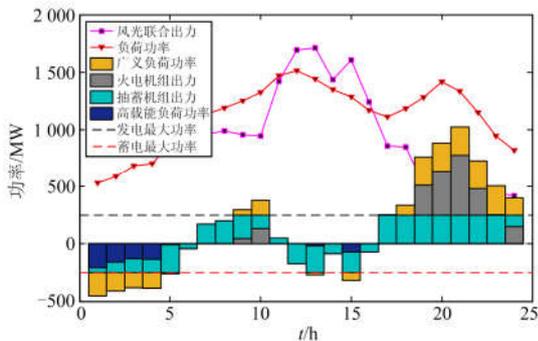


图 9 场景 3 联合优化调度实时出力

Fig. 9 Real-time output of scenes 3 combined optimal scheduling

由图 7 可以看出：当在广义负荷功率为负值的这 11 个时段里，用电侧未能及时地消纳新能源发电负荷，导致很严重的弃风弃光的现象，弃风弃光总量累计达到 2 850 MWh；当广义负荷功率为正值时，风光发电侧负荷不能满足用电负荷，此时火电机组出力来满足用电负荷侧要求；但是在第 20、21 时段，由于用电侧负荷需求过大，受到火电机组最大出力限制，发电侧发电功率未能达到用电侧需求功率，造成很严重的后果。

由图 8 可以看出：较前一系统，此系统在加入

了抽水蓄能电站后，弃风弃光得到了明显的改善，只在 1、2、3、4、13、15 这 6 个时段出现了弃风弃光的现象，弃风弃光总量下降到了 730 MWh。

由图 9 可以看出：与前两个系统比较，此系统在加入了抽水蓄能电站和高载能负荷后，风光发电负荷得到完全的消纳，弃风弃光总量下降到了 0 MWh，改善效果十分明显。

3 个场景负荷跟踪对比曲线如图 10 所示。

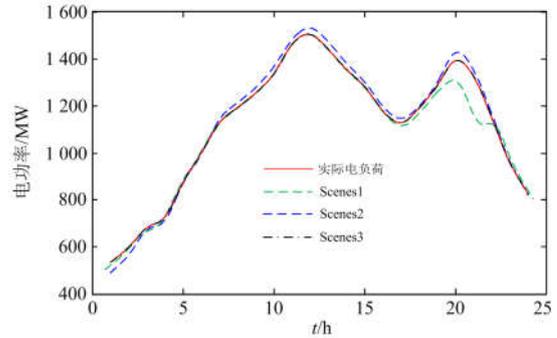


图 10 负荷跟踪对比曲线

Fig. 10 Load tracking contrast curve

由图 10 可以看出：场景 1 在第 20、21 两个时段内，发电负荷未能实时跟踪到用电负荷；而场景 2 和场景 3 在 24 个时段内可以完全跟踪到用电负荷，对比明显。

3 个场景弃风弃光量对比曲线如图 11 所示。

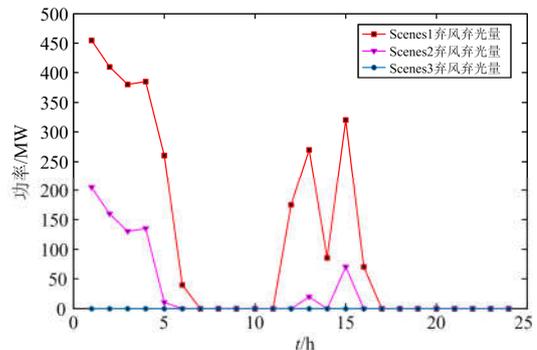


图 11 弃风弃光量对比曲线

Fig. 11 Discarded wind and light contrast curve

由图 11 可以看出：场景 1 在第 1—6、12—16 这 11 个时段内均出现了严重的弃风弃光现象；场景 2 在第 1—5、13、15 这 7 个时段内均出现弃风弃光的现象，较前一系统有了明显的改善；而场景 3 在 24 个时段内均未出现弃风弃光的现象，对比十分明显。

表 4 对比了 3 种场景中抽水蓄能与高载能负荷运行前后的调度结果。

表 4 3 种场景的调度结果对比

Table 4 Comparison of dispatch results of three scenes

场景 情况	弃风、弃光 电量/MWh	风光消 纳率/%	总费用/ 万元
场景 1	2 850	67.92	892.36
场景 2	730	86.90	834.67
场景 3	0	100	789.24

由表 4 可以看出: 在发电侧配置抽水蓄能, 由抽水蓄能和常规水电站协同运行, 不但可以大幅提高风电消纳率, 减少弃风弃光的现象, 而且有助于减少总调度成本, 提高系统运行经济性。但是, 仅通过配置抽水蓄能仍然存在部分弃风弃光, 而高载能负荷与抽水蓄能协调运行便可以进一步促进新能源发电消纳, 并有助于提高系统运行经济性。

3 种时间尺度功率跟踪偏差曲线如图 12 所示。

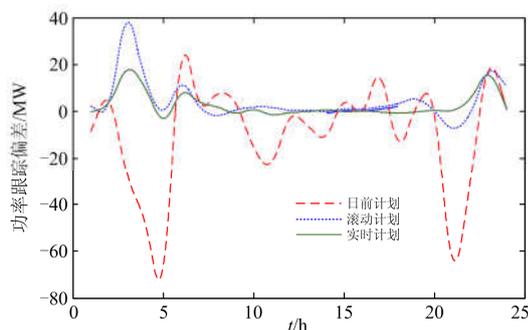


图 12 三种时间尺度功率跟踪偏差对比曲线

Fig. 12 Three kinds of time scale power tracking deviation contrast curves

由图 12 可以看出: 风光水火及高载能负荷的多源互补发电场群联合系统只采用日前计划时, 其出力与实际参考计划出力的偏差特别大, 未能符合系统调度的规定要求; 加入滚动计划后, 出力偏差明显减小; 在滚动计划的基础上加入实时计划后, 实时计划与参考计划的偏差相对于滚动计划与参考计划的偏差更小, 所以滚动计划可以较好地匹配实际的电力负荷。

实时计划功率跟踪曲线如图 13 所示。

由图 13 可以看出: 实时计划调度策略计划在日前计划的基础上, 通过滚动计划滚动地修正日内剩余发电计划, 再由实时计划不断地调整, 随着时间尺度的缩短调度计划不断更新, 实时计划制定出系统联合出力与实际电负荷匹配度更高的调度计划, 可以有效跟踪实际电负荷曲线, 提高调度精度, 能够促进大规模风光消纳。

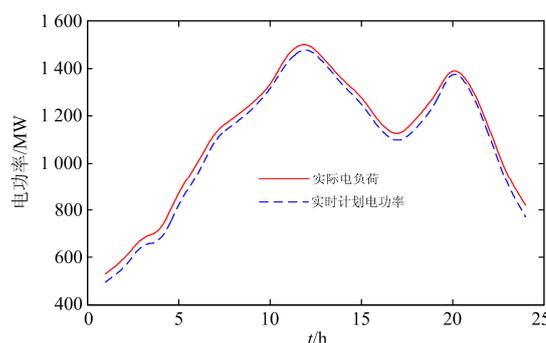


图 13 实时计划功率跟踪曲线

Fig. 13 Real time planned power tracking curves

6 结论

本策略在研究抽水蓄能电站和高载能负荷运行特性的基础上, 提出了基于多时空尺度协调的多源互补发电场群优化调度策略, 并建立了考虑抽水蓄能电站和高载能负荷调节特性的多时空尺度协调的多源互补发电场群的优化调度模型。通过仿真分析, 得到如下结论:

- 1) 通过对风光水火及高载能负荷的协调调度, 能够有效提高风光消纳水平, 促进系统经济运行。
- 2) 通过时间尺度和空间尺度多层协调控制运行能够逐级降低风光预测误差对调度计划的影响, 减小系统对负荷跟踪的误差, 提高调度精度。

参考文献

- [1] 中国国家能源局. 国家能源局综合司关于 2017 年前三季度缓解弃水弃风弃光状况的通报 [EB/OL]. [2017-11-09]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171114_3057.html.
- [2] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8, 25.
LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8, 25.
- [3] 曹宇, 汪可友, 石文辉, 等. 风-光-海水抽蓄联合发电系统的调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 16-23.
CAO Yu, WANG Keyou, SHI Wenhui, et al. Study on dispatching strategies of a wind-solar-seawater pumped storage hybrid power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 16-23.
- [4] 李文锋, 张健, 卜广全, 等. 抽蓄电站和经多端柔性直流电网接入的大规模新能源间的协调互补优化控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 130-135.
LI Wenfeng, ZHANG Jian, BU Guangquan, et al. A coordinate complementary optimization control scheme

- between pumped storage station and large-scale new renewable integrated through VSC-MTDC[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(23): 130-135.
- [5] 张川, 杨雷, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(7): 149-154.
ZHANG Chuan, YANG Lei, NIU Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(7): 149-154.
- [6] 贾文昭, 康重庆, 李丹, 等. 基于日前风功率预测的风电消纳能力评估方法[J]. *电网技术*, 2012, 36(8): 69-75.
JIA Wenzhao, KANG Chongqing, LI Dan, et al. Evaluation on capability of wind power accommodation based on its day-ahead forecasting[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(8): 69-75.
- [7] 赵书强, 王扬, 徐岩. 基于风电预测误差随机性的火储联合相关机会规划调度[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(增刊 1): 9-16.
ZHAO Shuqiang, WANG Yang, XU Yan. Dependent chance programming dispatching of integrated thermal power generation and energy storage system based on wind power forecasting error[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(S1): 9-16.
- [8] HETZER J, DAVID C, BHATTARAI K. An economic dispatch model incorporating wind power[J]. *IEEE Transactions on Power Energy Conversion*, 2008, 23(2): 603-611.
- [9] 吕翔, 刘国静, 周莹. 含抽水蓄能的风水火联合机组组合研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(12): 35-43.
LÜ Xiang, LIU Guojing, ZHOU Ying. Research on combined unit commitment of wind power-hydro power-thermal power for the power system with pumped hydro storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(12): 35-43.
- [10] 李碧辉, 申洪, 汤涌, 等. 风光储联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标[J]. *电网技术*, 2011, 35(4): 123-128.
LI Bihui, SHEN Hong, TANG Yong, et al. Impacts of energy storage capacity configuration of HPWS to active power characteristics and its relevant indices[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(4): 123-128.
- [11] 吴云亮, 孙元章, 徐箭, 等. 基于饱和控制理论的储能装置容量配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(22): 32-39.
WU Yunliang, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. Determination methodology for energy storage capacity based on saturation control theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(22): 32-39.
- [12] 杨珺, 张建成, 桂勋. 并网风光发电中混合储能系统容量优化配置[J]. *电网技术*, 2013, 37(5): 1209-1216.
YANG Jun, ZHANG Jiancheng, GUI Xun. Capacity optimization of hybrid energy storage system in grid-connected wind and PV power generation system[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(5): 1209-1216.
- [13] LI Jinghua, WANG Sai, YE Liu, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 21-34. DOI: 10.1186/s41601-017-0074-9.
- [14] CASTRONUOVO E D, LOPES J A P. On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(3): 1599-1606.
- [15] 刘芳, 潘毅, 杨军峰, 等. 风电-火电-抽水蓄能联合优化机组组合模型[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(4): 766-775.
LIU Fang, PAN Yi, YANG Junfeng, et al. Combination model of wind power-thermal power-pumped storage combined optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(4): 766-775.
- [16] 黄庶, 林舜江, 刘明波. 含风电场和抽水蓄能电站的多目标安全约束动态优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(1): 112-121.
HUANG Shu, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Multi-objective security constrained dynamic optimal dispatch with wind farms and pumped storage stations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1): 112-121.
- [17] 胡泽春, 丁华杰, 孔涛. 风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(2): 36-41.
HU Zechun, DING Huajie, KONG Tao. A joint daily operational optimization model for wind power and pumped-storage plant[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(2): 36-41.
- [18] 盛四清, 张立. 基于风光水火多能互补的电力系统经济调度[J]. *电测与仪表*, 2017, 53(22): 66-71.
SHENG Siqing, ZHANG Li. An economical scheduling strategy in power system based on integration of wind, photovoltaic, water and thermal power[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2017, 53(22): 66-71.
- [19] 陈巨龙, 赵翔宇. 基于增量表达式的滚动发电计划模型与其求解算法研究[J]. *软件工程师*, 2014(1): 45-49.
CHEN Julong, ZHAO Xiangyu. Study of rolling generation scheduling model based on an increment expression and its efficient algorithm[J]. *Software Engineer*, 2014(1): 45-49.

- [20] 王功臣, 邓长虹, 夏沛, 等. 考虑机组优化选取的含风电电网滚动优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 55-60.
WANG Gongchen, DENG Changhong, XIA Pei, et al. Rolling optimization dispatching method of power grid containing wind power with units optimal selection taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 55-60.
- [21] 王魁, 张步涵, 闫大威, 等. 含大规模风电的电力系统多时间尺度滚动协调调度方法研究[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2434-2440.
WANG Kui, ZHANG Buhan, YAN Dawei, et al. A multi-time scale rolling coordination scheduling method for power grid integrated with large scale wind farm[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2434-2440.
- [22] 董朕, 殷豪, 孟安波. 基于混合算法优化的短期风功率预测[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 24-30.
DONG Zhen, YIN Hao, MENG Anbo. Short-term wind power forecasting based on kernel extreme learning machine optimized by hybrid algorithm[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 24-30.
- [23] 夏鹏, 刘文颖, 蔡万通, 等. 基于风电离散化概率序列的机会约束规划优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(21): 5069-5079.
XIA Peng, LIU Wenying, CAI Wantong, et al. Optimal scheduling method of chance constrained programming based on discrete wind power probability sequences[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(21): 5069-5079.
- [24] 郭鹏, 文晶, 朱丹丹, 等. 基于源-荷互动的大规模风电消纳协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 1-9.
GUO Peng, WEN Jing, ZHU Dandan, et al. The coordination control strategy for large-scale wind power consumption based on source-load interactive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 1-9.
- [25] 王昭. 多能互补系统中电价机制对电加热功率配置及运行的影响分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(7): 23-28.
WANG Zhao. Study on the influence of electricity price mechanism on configuration and operation of electric heating power in multiple energy complementary system[J]. Smart Power, 2018, 46(7): 23-28.
- [26] 易文飞, 张艺伟, 曾博, 等. 多形态激励型需求侧响应协同平衡可再生能源波动的鲁棒优化配置[J]. 电工技术学报, 2018, 33(23): 5541-5554.
YI Wenfei, ZHANG Yiwei, ZENG Bo, et al. Robust optimization allocation for multi-type incentive-based demand response collaboration to balance renewable energy fluctuations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23): 5541-5554.
- [27] 邓佳乐, 胡林献, 邵世圻, 等. 电热联合系统多时间尺度滚动调度策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3796-3803.
DENG Jiale, HU Linxian, SHAO Shiqi, et al. Multi-time scale rolling scheduling method for combined heat and power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3796-3803.
- [28] TING T O, RAO M V C, LOO C K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 411-418.

收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-11-18

作者简介:

刘德顺(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电智能优化控制; Email: liudeshun1207@163.com

董海鹰(1966—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化运行与智能控制, 新能源发电优化控制; Email: hydong@mail.lzjtu.cn

汪宁渤(1963—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源发电与并网运行控制技术。E-mail: wangnb@gs.sgcc.com.cn

(编辑 周金梅)