

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.014

# 风-光-抽蓄零碳电力系统多时间尺度协调调度模型

赵心怡, 谢俊, 周翠玉, 邢单玺

(河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:**高比例新能源并网带来的波动性影响和新能源消纳水平不足已成为新型电力系统中亟须解决的问题。为此,基于风、光、负荷预测精度随时间尺度缩短而逐级提高的特点和抽蓄机组日内灵活调节特性,建立风-光-抽蓄零碳电力系统多时间尺度协调调度模型。以运行成本最小为目标,建立日前24 h发电计划、日内1 h发电计划和实时15 min发电计划。通过多时间尺度的协调配合,保证风、光、抽蓄出力良好跟踪负荷,逐级修正发电计划。以含6台抽蓄机组的风-光-抽蓄零碳电力系统为例开展仿真分析,结果表明所提多时间尺度协调调度模型有利于减少系统弃风、弃光量,且系统消纳风光的能力与抽蓄电站装机容量有关。

**关键词:**抽蓄电站;新能源消纳;风-光-抽蓄零碳电力系统;多时间尺度协调调度;预测精度;发电计划

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)03-0121-09

## 0 引言

随着能源转型的推进,构建以能源供给清洁化、能源消费电气化为特征的新型电力系统迫在眉睫<sup>[1-4]</sup>。以风光为代表的清洁能源将逐步代替传统火电成为电力系统发电主体,在缺乏大规模火电提供备用支撑的情况下亟须开发能够适应高比例可再生能源并网的储能技术和快速功率调节手段<sup>[5]</sup>。

抽蓄电站作为目前最经济、最成熟的优质调节电源之一,在促进可再生能源消纳方面发挥着不可或缺的作用<sup>[6-9]</sup>。抽蓄机组具有调节迅速、运行方式灵活的特点,同时其具备发电和抽水2种运行工况,可与电网产生双向互动。抽蓄机组在负荷低谷期抽水至上水库以存储富余电量,在负荷高峰期放水发电以缓解系统调峰压力,实现电能存储和能量转换<sup>[10-11]</sup>。此外,抽蓄机组能为电力系统提供旋转备用容量,降低风光等新能源出力不确定性对电网调度运行的影响。

目前,已有大量学者就抽蓄电站与其他电源的联合优化调度展开研究。文献[12-14]提出抽蓄和风电联合运行调度策略,有效减少了电网弃风。文献[15]利用抽蓄和电池进行联合储能以提升系统新能源消纳水平。文献[16]建立内外2层模型验证了风蓄火联合优化调度可在减少弃风量的同时增加系统经济效益。文献[17]提出一种火/储/荷日前优化调度策略,并控制抽蓄容量状态以提高抽

蓄调峰效果。文献[18]针对旋转备用优化问题,建立风-水-火-气-核-抽蓄多类型电源协同调度模型,能有效兼顾风电不确定性带来的风险成本和系统综合效益。文献[19]提出利用抽蓄和电池储能调节光伏电站出力波动以促进大规模光伏并网消纳,提升系统低碳化经济运行水平。文献[20-22]兼顾经济效益、调峰能力、环境价值,从多角度对含抽蓄电站的混合能源系统进行评价分析,从而优化配置抽蓄电站容量。因此,在电力系统内合理配置抽蓄容量,利用抽蓄与各类电源协调运行,可提升系统调峰能力与新能源消纳水平,促进电力系统安全经济运行。

上述文献均只涉及抽蓄机组的日前调度,并未深入挖掘日内小时级、分钟级下抽蓄机组的灵活调节能力。为此,文献[23]提出两阶段的短时间尺度水电、光伏、抽蓄多能互补发电系统备用容量确定策略,首先开展小时级的发电容量配置,然后进行分钟级的抽蓄备用容量优化。文献[24]聚焦日前-日内风电场与抽蓄储能系统的滚动优化,利用不断更新的预测信息和抽蓄调节能力提升联合运行收益。文献[25]依据火电、抽蓄、电池等不同电源的功率调节能力和调节速度建立日前-1 h前-15 min前协调调度模型,深入挖掘不同时间尺度下的电源特性。文献[26]建立日内两阶段优化的风储联合发电系统模型,充分利用抽蓄机组在日内时间尺度下的灵活调节特性。电力系统发电计划的制定依赖于负荷预测的准确性和发电机组出力的可靠性,根据风、光、负荷预测精度随预测时间尺度缩小而提高的特点,利用抽蓄等灵活调节电源不断修正发电计划,可有效缓解新能源出力随机波动性的影响。

收稿日期:2022-10-25;修回日期:2023-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1965104);国家电网有限公司总部科技项目“计及分布式灵活调节资源的电力紧平衡状态实时预警及协同处置策略研究”(SGJS0000D-KJS2100973)

现有针对含抽蓄的多时间尺度调度研究中,研究对象大多为含碳电力系统,且对于抽蓄机组在不同时间尺度下的调节性能缺乏深入探索;针对含抽蓄的清洁电力系统,则大多聚焦日前调度,缺乏对多时间尺度协调调度的分析。

因此,文中基于风-光-抽蓄零碳电力系统建立日前-日内-实时三阶段协调调度模型,以概率区间的形式描述风光出力的不确定性,对抽蓄机组在不同运行工况下提供的旋转备用容量进行精细化分类与建模,充分发挥抽蓄机组的灵活调节能力,跟踪负荷需求,逐级消纳不同时间尺度下的风光出力波动,探究抽蓄电站容量的最佳配置,促进清洁能源的高效利用。

## 1 多时间尺度调度的基本架构

风电、光伏、负荷预测精度随时间尺度的缩小而逐级提高,利用不断更新的预测信息,建立日前24 h调度、日内1 h调度、实时15 min调度的风-光-抽蓄零碳电力系统多时间尺度协调调度模型。

(1) 日前调度模型:每24 h执行一次,一天执行1次,分辨率为1 h。采用风、光、负荷提前24 h预测数据,优化得出未来24 h抽蓄机组组合情况和各类资源计划出力。

(2) 日内1 h调度模型:每1 h执行一次,一天执行24次,分辨率为15 min。采用风、光、负荷提前1 h预测数据以及日前调度计划确定的抽蓄机组组合和抽蓄机组计划出力,优化得出未来1 h各类资源计划出力。

(3) 实时15 min调度模型:每15 min执行一次,一天执行96次,分辨率为15 min。采用风、光、负荷提前15 min预测数据、日前调度计划确定的抽蓄机组组合和日内调度确定的抽蓄机组出力,优化得出未来15 min抽蓄机组计划出力和机组出力调整量。

日前-日内-实时协调调度关系如图1所示。图中不同时间尺度调度计划下的黑、灰色块均代表当前调度周期的分辨率。

## 2 多时间尺度调度模型

### 2.1 日前调度模型

#### 2.1.1 日前调度目标函数

抽蓄机组具备启停迅速、工况可灵活调节的优势,但机组在频繁启停过程中必然产生物理损耗,因此其运行成本仅包括在不同运行工况间转换时产生的启停损耗成本。同时为实现清洁能源的高

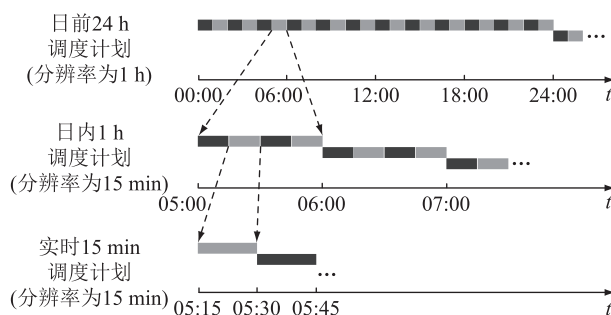


图1 日前-日内-实时协调调度关系

Fig.1 The relationship between day-ahead dispatch, in-day dispatch, and real-time dispatch

效利用,引入弃风、弃光惩罚系数。日前调度模型以系统总运行成本最小为目标,包括抽蓄机组启停损耗成本<sup>[27]</sup>和弃风、弃光惩罚成本,具体表示为:

$$\min F = F_{ps} + F_a \quad (1)$$

$$F_{ps} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \{ C_{on} [I_{j,t}^g (1 - I_{j,t-1}^g) + I_{j,t}^p (1 - I_{j,t-1}^p)] + C_{off} [I_{j,t-1}^g (1 - I_{j,t}^g) + I_{j,t-1}^p (1 - I_{j,t}^p)] \} \quad (2)$$

$$F_a = \sum_{t=1}^T (\lambda_w A_{w,t} + \lambda_v A_{v,t}) \quad (3)$$

式中:  $F$  为风-光-抽蓄联合系统总运行成本;  $F_{ps}$  为抽蓄机组运行成本;  $F_a$  为弃风、弃光惩罚成本;  $T$  为调度周期内的总时段数;  $J$  为抽蓄机组总数;  $C_{on}$ 、 $C_{off}$  分别为抽蓄机组的启动成本系数和关停成本系数;  $I_{j,t}^g$ 、 $I_{j,t}^p$  为0-1变量,分别表征抽蓄机组  $j$  在  $t$  时段是否处于发电工况或抽水工况,取1为是,取0为否;  $\lambda_w$  为弃风惩罚成本系数;  $A_{w,t}$  为  $t$  时段风电场的弃风电量;  $\lambda_v$  为弃光惩罚成本系数;  $A_{v,t}$  为  $t$  时段光伏电站的弃光电量。

#### 2.1.2 日前调度约束条件

(1) 风光出力约束。在含风电的多能互补系统随机优化调度模型中,通常以概率区间的形式描述风电出力的不确定性。

$$0 \leq P_{w,t} \leq P_{w,N} \quad (4)$$

$$P_{w,t}^{up} = \mu_{w,t} + 1.96\sigma_{w,t} \quad (5)$$

$$P_{w,t}^{dn} = \mu_{w,t} - 1.96\sigma_{w,t} \quad (6)$$

$$P_{w,max,t} = \min\{P_{w,t}^{up}, P_{w,N}\} \quad (7)$$

$$P_{w,min,t} = \max\{0, P_{w,t}^{dn}\} \quad (8)$$

$$P_{w,min,t} \leq P_{w,t} \leq P_{w,max,t} \quad (9)$$

$$A_{w,t} = P_{w,max,t} - P_{w,t} \quad (10)$$

式中:  $P_{w,t}$  为  $t$  时段风电调度出力;  $P_{w,N}$  为风电场的装机容量;  $P_{w,t}^{up}$ 、 $P_{w,t}^{dn}$  分别为  $t$  时段风电预测出力上、下限;  $\mu_{w,t}$ 、 $\sigma_{w,t}$  分别为  $t$  时段风电预测出力概率分布的均值和标准差;  $P_{w,max,t}$ 、 $P_{w,min,t}$  分别为  $t$  时段风电场可用功率上、下限。若风电输出功率区间过

大,则会降低系统优化调度的经济性,甚至使得调度模型无解。因此,设定风电的出力区间为 $[\mu_{w,t} - 1.96\sigma_{w,t}, \mu_{w,t} + 1.96\sigma_{w,t}]$ ,以保证至少95%的风电出力得以利用。光伏发电出力建模与风电一致,不再赘述。

(2) 抽蓄机组出力约束。

$$I_{j,t}^g P_{j,\min}^g \leq P_{j,t}^g \leq I_{j,t}^g P_{j,\max}^g \quad (11)$$

$$I_{j,t}^p P_{j,\min}^p \leq P_{j,t}^p \leq I_{j,t}^p P_{j,\max}^p \quad (12)$$

式中: $P_{j,t}^g$ 、 $P_{j,t}^p$ 分别为 $t$ 时段抽蓄机组 $j$ 的发电功率和抽水功率; $P_{j,\max}^g$ 、 $P_{j,\min}^g$ 分别为抽蓄机组 $j$ 的最大、最小发电功率; $P_{j,\max}^p$ 、 $P_{j,\min}^p$ 分别为抽蓄机组 $j$ 的最大、最小抽水功率。

(3) 抽蓄机组运行工况约束。

$$I_{j,t}^g + I_{j,t}^p \leq 1 \quad (13)$$

$$\sum_{j=1, j \neq j'}^J I_{j,t}^g \leq (J-1) - (J-1)I_{j',t}^p \quad (14)$$

$$\sum_{j=1, j \neq j'}^J I_{j,t}^p \leq (J-1) - (J-1)I_{j',t}^g \quad (15)$$

式(13)保证单台抽蓄机组不能同时在发电和抽水模式下运行。此外,抽蓄电站的上水库和水泵水轮机之间通常包括一段压力水管,所以无论抽蓄机组数量如何,都不能同时在发电和抽水模式下运行。换言之,如果至少1台抽蓄机组在发电模式下运行,那么同一时刻其他任何机组都不能在抽水模式下运行,反之亦然。式(14)、式(15)即为同一时刻下抽蓄机组群的抽发互斥运行条件。

(4) 抽蓄电站水量约束。

$$X_t = X_{t-1} + \sum_{j=1}^J (\eta_j^p P_{j,t}^p - \eta_j^g P_{j,t}^g) \quad (16)$$

$$X_{\min} \leq X_t \leq X_{\max} \quad (17)$$

$$X_T = X_0 \quad (18)$$

式中: $X_t$ 为 $t$ 时段抽蓄电站上水库的库容; $\eta_j^p$ 、 $\eta_j^g$ 分别为抽蓄机组 $j$ 处于抽水和发电工况时由电量至水量的转换系数; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为上水库的最大、最小蓄水量; $X_0$ 为上水库的初始库容; $X_T$ 为调度期末上水库的库容。式(18)保证了抽蓄电站上水库日运行能量平衡。

(5) 抽蓄机组备用容量约束<sup>[28]</sup>。

$$P_{j,t}^g + R_{j,t}^{gu} \leq P_{j,\max}^g I_{j,t}^g \quad (19)$$

$$P_{j,t}^g - R_{j,t}^{gd} \geq P_{j,\min}^g I_{j,t}^g \quad (20)$$

$$P_{j,t}^p + R_{j,t}^{pu} \leq P_{j,\max}^p I_{j,t}^p \quad (21)$$

$$P_{j,t}^p - R_{j,t}^{pd} \geq P_{j,\min}^p I_{j,t}^p \quad (22)$$

式中: $R_{j,t}^{gu}$ 、 $R_{j,t}^{gd}$ 分别为发电工况下 $t$ 时段抽蓄机组 $j$ 提供的上、下备用容量; $R_{j,t}^{pu}$ 、 $R_{j,t}^{pd}$ 分别为抽水工况下 $t$ 时段抽蓄机组 $j$ 提供的上、下备用容量。

(6) 系统旋转备用需求约束。

$$\sum_{j=1}^J (R_{j,t}^{gu} + R_{j,t}^{pd}) \geq \alpha (P_{w,t} - P_{w,\min,t}) + \beta (P_{v,t} - P_{v,\min,t}) \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^J (R_{j,t}^{gd} + R_{j,t}^{pu}) \geq \alpha (P_{w,\max,t} - P_{w,t}) + \beta (P_{v,\max,t} - P_{v,t}) \quad (24)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为应对风电、光伏出力不确定性的备用需求系数,约为15%~25%<sup>[29]</sup>;  $P_{v,t}$ 为 $t$ 时段光伏调度出力; $P_{v,\max,t}$ 、 $P_{v,\min,t}$ 分别为 $t$ 时段光伏电站可用功率上、下限。

(7) 系统功率平衡约束。

$$P_{w,t}^{\text{day}} + P_{v,t}^{\text{day}} + \sum_{j=1}^J (P_{j,t}^{\text{g,day}} - P_{j,t}^{\text{p,day}}) = P_{L,t}^{\text{day}} \quad (25)$$

式中: $P_{w,t}^{\text{day}}$ 为日前模型中风电场在 $t$ 时段的调度出力; $P_{v,t}^{\text{day}}$ 为日前模型中光伏电站在 $t$ 时段的调度出力; $P_{j,t}^{\text{g,day}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{p,day}}$ 分别为日前模型中抽蓄机组 $j$ 在 $t$ 时段的发电功率和抽水功率; $P_{L,t}^{\text{day}}$ 为提前一天预测的 $t$ 时段负荷功率。

## 2.2 日内调度模型

### 2.2.1 日内调度目标函数

由于日前调度模型已经优化得出未来24h的抽蓄机组组合情况,因此日内模型中抽蓄机组的抽发启停状态不变。通过调整机组出力大小,消纳新的时间尺度下风光负荷预测的偏差量。为充分发挥日内小时级时间尺度下抽蓄机组的快速灵活调节能力,兼顾风光清洁能源的高效利用,日内调度模型以最小化抽蓄机组出力调整成本和弃风、弃光惩罚成本为目标。

$$\min(F_{\Delta ps} + F_a) \quad (26)$$

$$F_{\Delta ps} = \sum_{t=t_0}^{t_0+N_T} \sum_{j=1}^J C_{\Delta ps} \Delta P_{ps,j,t}^{\text{hour}} \quad (27)$$

$$F_a = \sum_{t=t_0}^{t_0+N_T} (\lambda_w A_{w,t} + \lambda_v A_{v,t}) \quad (28)$$

式中: $F_{\Delta ps}$ 为每个调度周期的抽蓄机组出力调整成本; $t_0$ 为每个调度周期开始时段; $N_T$ 为日内调度周期内的总时段数(日内1h调度周期包含4个15min时段); $C_{\Delta ps}$ 为机组出力单位调整成本系数; $\Delta P_{ps,j,t}^{\text{hour}}$ 为抽蓄机组 $j$ 在 $t$ 时段相较于日前的出力调整量,可细分为发电功率调整量和抽水功率调整量,即 $\Delta P_{ps,j,t}^{\text{hour}} = |P_{j,t}^{\text{g,hour}} - P_{j,t}^{\text{g,day}}| + |P_{j,t}^{\text{p,hour}} - P_{j,t}^{\text{p,day}}|$ ,其中 $P_{j,t}^{\text{g,hour}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{p,hour}}$ 分别为抽蓄机组 $j$ 在日内小时级调度计划下的发电功率和抽水功率。

### 2.2.2 日内调度约束条件

(1) 系统功率平衡约束。

$$P_{w,t}^{\text{hour}} + P_{v,t}^{\text{hour}} + \sum_{j=1}^J (P_{j,t}^{\text{g, hour}} - P_{j,t}^{\text{p, hour}}) = P_{L,t}^{\text{hour}} \quad (29)$$

式中:  $P_{w,t}^{\text{hour}}$  为日内模型中风电场在  $t$  时段的调度出力;  $P_{v,t}^{\text{hour}}$  为日内模型中光伏电站在  $t$  时段的调度出力;  $P_{L,t}^{\text{hour}}$  为提前 1 h 预测的  $t$  时段负荷功率。

(2) 日内调度结束时抽蓄电站日运行水量平衡约束<sup>[30]</sup>。

$$X_{\text{end}}^{\text{hour}} = X_0 \quad (30)$$

式中:  $X_{\text{end}}^{\text{hour}}$  为日末时刻经过小时级滚动调度后抽蓄电站上水库储存水量。式(30)仅在当天最后一个调度周期时引入,以保持日运行水量平衡,保证抽蓄电站下一日的正常运行。

由于日内模型中抽蓄机组的抽发启停状态不变,因此不考虑抽蓄机组运行工况约束。风、光出力约束,抽蓄机组其他约束以及旋转备用需求约束类似日前调度模型中式(4)一式(12)、式(16)、式(17)、式(19)一式(24)。

### 2.3 实时调度模型

#### 2.3.1 实时调度目标函数

实时调度侧重于对下一个调度时段(未来 15 min)的抽蓄机组出力进行修正,在日内 1 h 计划确定的机组出力值的基础上,根据最新的风光负荷 15 min 前超短期预测数据,修正日内计划遗留的偏差量。由于实时调度阶段风光的预测精度达到了较高的水平,因此目标函数中可以不考虑弃风弃光电量最小化。为充分利用抽蓄机组分钟级灵活调节特性,实时调度模型以抽蓄机组出力实时调整成本最小为目标。

$$\min F_{\Delta\text{ps}} = \sum_{j=1}^J C_{\Delta\text{ps}} \Delta P_{\text{ps},j,t}^{\text{real}} \quad (31)$$

式中:  $\Delta P_{\text{ps},j,t}^{\text{real}}$  为抽蓄机组  $j$  在  $t$  时段相较于日内调度计划的实时出力调整量,可表示为  $\Delta P_{\text{ps},j,t}^{\text{real}} = |P_{j,t}^{\text{g, real}} - P_{j,t}^{\text{g, hour}}| + |P_{j,t}^{\text{p, real}} - P_{j,t}^{\text{p, hour}}|$ , 其中  $P_{j,t}^{\text{g, real}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{p, real}}$  分别为抽蓄机组  $j$  在实时调度下的发电功率和抽水功率。

#### 2.3.2 实时调度约束条件

(1) 系统功率平衡约束。

$$P_{w,t}^{\text{real}} + P_{v,t}^{\text{real}} + \sum_{j=1}^J (P_{j,t}^{\text{g, real}} - P_{j,t}^{\text{p, real}}) = P_{L,t}^{\text{real}} \quad (32)$$

式中:  $P_{w,t}^{\text{real}}$  为实时模型中风电场在  $t$  时段的调度出力;  $P_{v,t}^{\text{real}}$  为实时模型中光伏电站在  $t$  时段的调度出力;  $P_{L,t}^{\text{real}}$  为提前 15 min 预测的  $t$  时段负荷。

(2) 实时调度结束时抽蓄电站日运行水量平衡约束。

$$X_{\text{end}}^{\text{real}} = X_0 \quad (33)$$

式中:  $X_{\text{end}}^{\text{real}}$  为日末时刻经过实时滚动调度后抽蓄电站上水库储存水量。式(33)仅在当天最后一个调度周期时引入,以保持日运行水量平衡,保证抽蓄电站下一日的正常运行。

其余约束条件与日内调度模型相同。

## 3 算例分析

### 3.1 算例描述

参考我国张北零碳电力系统示范工程,结合文献[31]中的配置方案对风-光-抽蓄零碳电力系统进行多时间尺度协调调度算例仿真。配置风电场和光伏电站接入总装机容量为 3 300 MW,容量配比为 2:1。抽蓄电站由 6 台单机额定容量为 3 00 MW 的变速恒频机组构成,总装机容量为 1 800 MW。参考美国巴斯康蒂抽蓄电站<sup>[32]</sup>设置机组参数,抽水、发电功率可在 10%~100%的功率区间内连续调节,具体参数如表 1 所示。弃风、弃光惩罚成本取 2 100 元/(MW·h),机组出力单位调整成本系数取 700 元/MW。文中风电和光伏出力日前、日内、实时预测误差分别为 20%、5%、2%,负荷日前、日内、实时预测误差分别为 3%、1%、0.5%<sup>[33]</sup>。图 2 为多时间尺度下风电和光伏的预测出力区间。图 3 为多时间尺度下负荷预测出力曲线。图 4 为多时间尺度调度流程。日前、日内、实时 3 个时间尺度预测下的风光负荷数据将作为已知量代入模型求解。

表 1 抽蓄电站参数

Table 1 Parameters of pumped storage station

参数	数值	参数	数值
$P_{j,\text{min}}^{\text{g}}/\text{MW}$	15	$\eta_j^{\text{p}}/[\text{m}^3 \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	780
$P_{j,\text{max}}^{\text{g}}/\text{MW}$	300	$X_0/10^7 \text{m}^3$	2
$P_{j,\text{min}}^{\text{p}}/\text{MW}$	30	$X_{\text{min}}/10^7 \text{m}^3$	1.06
$P_{j,\text{max}}^{\text{p}}/\text{MW}$	300	$X_{\text{max}}/10^7 \text{m}^3$	4.38
$\eta_j^{\text{g}}/[\text{m}^3 \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	999	$J$	6

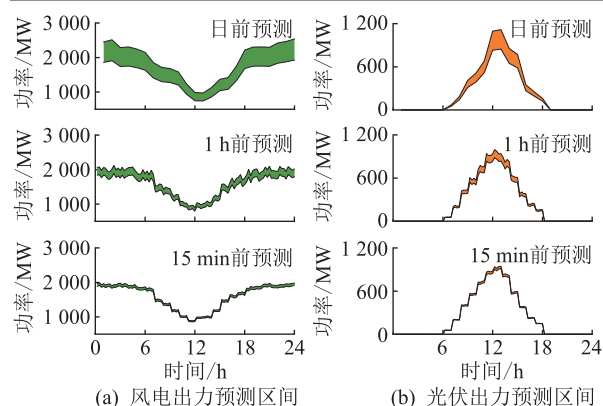


图 2 多时间尺度下风电和光伏出力预测区间  
Fig.2 Predicted output range of wind power and photovoltaic in multi-time scales

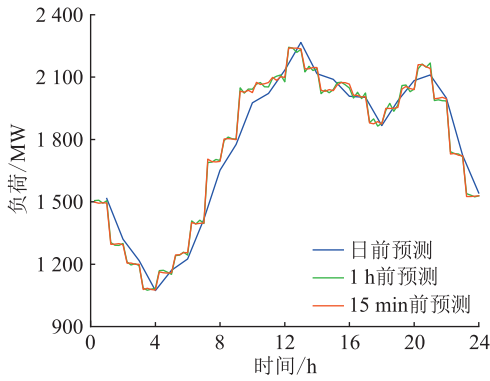


图3 多时间尺度下负荷预测出力

Fig.3 Predicted output of load in multi-time scales

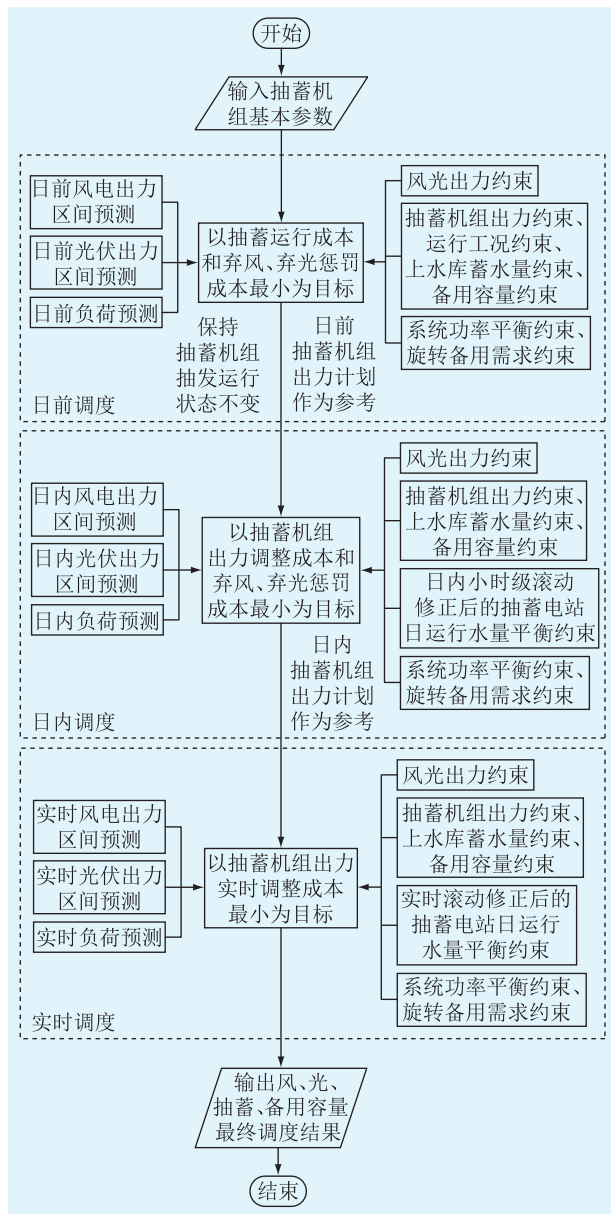


图4 多时间尺度调度流程

Fig.4 Flow chart of multi-time scale dispatching method

3.2 模型求解

机组组合问题由于包含诸多离散变量和连续

变量,在数学上体现为具有非凸和非线性特点的混合整数规划问题。因此,为简化求解模型、提高求解的效率,文中将对非线性问题进行线性化转换。在日前调度模型中,抽蓄机组运行成本包含  $I_{j,t}^E, I_{j,t-1}^E$  和  $I_{j,t}^G, I_{j,t-1}^G$  这2个二元整型变量乘积组成的非线性项,可以引入新的变量和约束对其进行线性化转换<sup>[34]</sup>。以  $I_{j,t}^E, I_{j,t-1}^E$  为例,引入新的二元整型变量  $I_{j,t}^C$ , 并令  $I_{j,t}^C = I_{j,t}^E, I_{j,t-1}^E$ , 则可等效为线性化约束:

$$\begin{cases} 0 \leq I_{j,t}^C \leq I_{j,t}^E \\ I_{j,t}^C \leq I_{j,t-1}^E \\ I_{j,t}^C \geq I_{j,t}^E + I_{j,t-1}^E - 1 \end{cases} \quad (34)$$

同理,  $I_{j,t}^G, I_{j,t-1}^G$  也可转换为线性化约束,从而在式(2)中消除非线性项,整个模型转化为混合整数线性规划问题进行求解。文中基于 Intel 2.6 GHz 双核处理器和 8 GB 内存的个人计算机,使用 CPLEX12.6 商业软件进行各调度模型的求解。

3.3 多时间尺度调度结果分析

图5为经多时间尺度协调调度后抽蓄电站调度结果,图中展示了一天中6台抽蓄机组整体发电、抽水功率及上水库库容随负荷变化情况。从图5中可以看出,抽蓄机组在一天中负荷低谷时期(1时—7时,22时—24时)抽水,上水库库容不断提高;在负荷高峰期(8时—21时)放电,上水库库容不断下降。整个调度流程结束,抽蓄电站合计发电量 14 872 MW·h,合计抽水耗电量 19 047 MW·h,抽蓄机组通过抽蓄和放水发电维持了调节周期始末水库库容的平衡。

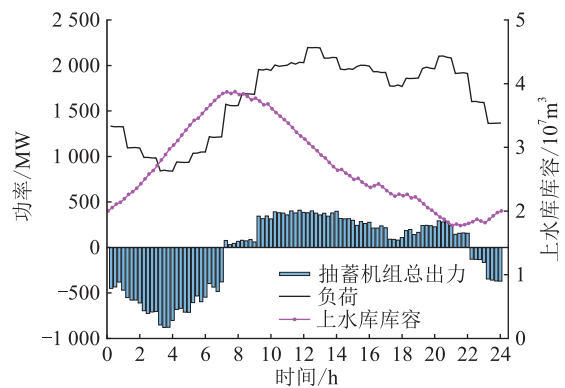


图5 抽蓄电站调度结果

Fig.5 Dispatching results of pumped storage station

图6为调度后各类资源出力情况,图中各色块叠加在一起应形成负荷曲线。由图可见,高出负荷曲线的绿色风电总是对应一块出力为负值的蓝色抽蓄机组出力,这表明夜间发出风电过多时,由抽蓄机组吸收多余电能进行储存;7时—22时,风光总出力低于负荷曲线,此时也有一块蓝色抽蓄机

组出力弥补了功率缺额,表明抽蓄机组在负荷高峰时进行放电。由于风电具有反调峰特性,因此抽蓄电站能够在夜间负荷低谷时,利用风电富余的电能将下水库的水抽到上水库存储起来,待白天负荷高峰、风光出力不足时放水发电,为系统补充缺额的发电功率,起到转移负荷、削峰填谷的作用。

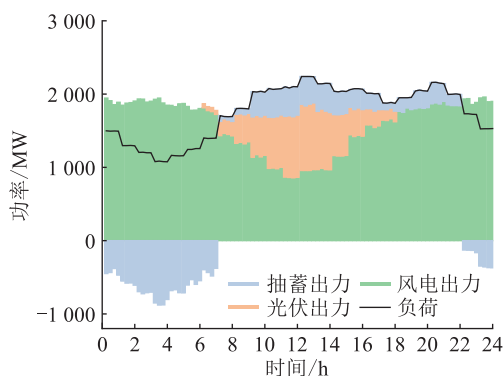


图6 各类资源出力堆叠图

Fig.6 Output stacking diagram of various resources

综上所述,抽蓄机组能够利用灵活调节能力快速跟踪负荷变化,弥补新能源出力的波动性,减少弃风弃光。

### 3.4 模型对比分析

为了分析文中所提多时间尺度滚动调度模型的有效性,将其与其他调度模型进行对比研究。

模型一:仅采用文中的日前调度模型对一天内的风光抽蓄资源进行优化调度。

模型二:采用文中的多时间尺度协调调度模型对一天内的风光抽蓄资源进行优化调度。

表2为2种模型优化结果对比,其中弃风、弃光电量和备用容量的数值都是一天内的优化变量总和。表2中模型二的弃风、弃光电量相较于模型一有显著降低,说明多时间尺度协调调度能够实现风光预测偏差量的逐级消纳,提高清洁能源的消纳水平,这是单一时间尺度调度无法达到的效果。在含抽蓄电站的风光清洁能源系统中,抽蓄机组通过提供上下旋转备用容量应对风光出力的波动性。

表2 2种模型优化结果

Table 2 Optimization result of two models

模型	弃风电量/(MW·h)	弃光电量/(MW·h)	向上备用容量/MW	向下备用容量/MW
模型一	9 204.4	1 916.7	33 791	42 364
模型二	5 047.5	911.3	27 336	23 919

由表2可见,模型二抽蓄机组提供的向上、向下旋转备用容量均低于模型一,这是由于多时间尺度协调调度模型的日内及实时阶段风、光、负荷的预

测精度较模型一的日前调度阶段均有较大提升,因此抽蓄机组提供比模型一更少的旋转备用容量即可补偿风、光、负荷的不确定性影响,同时也缓解了抽蓄机组的调节负担。

### 3.5 抽蓄电站容量配置分析

为分析抽蓄电站装机容量规模对系统消纳新能源水平的影响,文中对不同抽蓄容量配置方案展开了研究。图7为接入不同容量的抽蓄时系统弃风、弃光变化情况。由图可知,系统弃风、弃光电量随抽蓄电站装机容量的扩张先显著降低后趋于平缓,当抽蓄电站装机容量超过1 500 MW后,弃风、弃光电量的下降水平十分有限,这意味着用于消纳风光的抽蓄容量趋于饱和。对于配置了一定风光容量的系统,刚开始增加抽蓄装机容量使得系统具备灵活调节的储能能力,有利于消纳富余的风光功率并快速跟踪风光出力变化。当逐渐增加的抽蓄电站容量超过所需的调峰容量后,系统调峰约束不再是造成新能源弃电的主要因素。因此,对于含抽蓄电站的电力系统,应考虑最佳储能容量配置,以最大化消纳风光等清洁能源。

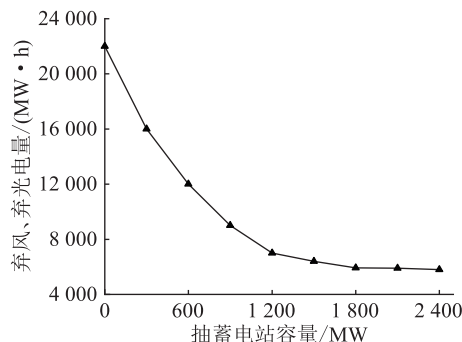


图7 接入不同容量抽蓄时的弃风和弃光电量

Fig.7 Curtailment of wind power and photovoltaic with different capacities of pumped storage

## 4 结论

针对新型电力系统背景下高比例新能源并网带来的波动性影响和新能源消纳水平不足的问题,文中提出一种风-光-抽蓄零碳电力系统多时间尺度协调调度模型,利用风电、光伏、负荷功率预测精度随时间尺度缩短而逐级提高的特点,建立日前-日内-实时三阶段的风-光-抽蓄协调调度模型。结论如下:

(1) 抽蓄机组能够利用灵活调节能力快速跟踪负荷变化,不断调整机组出力以应对风光出力的波动性。

(2) 相较于单一时间尺度调度,从日前到日内再到实时的多时间尺度协调调度模型能够利用不

断更新的风光负荷预测信息逐级消纳预测偏差量,减少弃风弃光电量,提高电网对新能源的消纳水平。

(3) 对于具有一定风光装机容量的电网,应考虑最佳抽蓄容量配置从而最大化消纳新能源。

文中设计风-光-抽蓄零碳电力系统的多时间尺度协调调度模型,并未涉及火电机组。然而从我国能源装机结构来看,火电仍然是最主要的能源,抽蓄是我国目前最具大规模开发条件的储能方式。因此,研究风-光-火-抽蓄多能互补发电系统的多时间尺度协调调度模型将成为后续关注内容。

#### 参考文献:

- [1] 唐跃中,夏清,张鹏飞,等. 能源互联网价值创造、业态创新与发展战略[J]. 全球能源互联网,2022,5(2):105-115.  
TANG Yuezhong, XIA Qing, ZHANG Pengfei, et al. Value creation, business model innovation and development plan of the energy Internet [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(2): 105-115.
- [2] 江冰. 构建面向30·60的新型电力系统:中国电力4.0的思考[J]. 全球能源互联网,2021,4(6):534-541.  
JIANG Bing. Building new power system for 30·60—reflections on China's electricity 4.0 [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 534-541.
- [3] 张小平,鲁宗相,马世英. 能源转型中的电力系统规划关键技术及案例研究[J]. 全球能源互联网,2021,4(4):321-322.  
ZHANG Xiaoping, LU Zongxiang, MA Shiyang. Key technologies and case studies of power system planning in energy transformation [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 321-322.
- [4] 欧清海,王盛鑫,余蕊,等. 面向新型电力系统的电力通信网需求及应用场景探索[J]. 供用电,2022,39(2):2-8,21.  
OU Qinghai, WANG Shengxin, SHE Rui, et al. Exploration of power communication network requirements and application scenarios for new power systems [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 2-8, 21.
- [5] 程春田. 碳中和下的水电角色重塑及其关键问题[J]. 电力系统自动化,2021,45(16):29-36.  
CHENG Chuntian. Function remolding of hydropower systems for carbon neutral and its key problems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 29-36.
- [6] 舒印彪,薛禹胜,蔡斌,等. 关于能源转型分析的评述(一)转型要素及研究范式[J]. 电力系统自动化,2018,42(9):1-15.  
SHU Yinbiao, XUE Yusheng, CAI Bin, et al. A review of energy transition analysis part one elements and paradigms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 1-15.
- [7] 舒印彪,薛禹胜,蔡斌,等. 关于能源转型分析的评述(二)不确定性及其应对[J]. 电力系统自动化,2018,42(10):1-12.  
SHU Yinbiao, XUE Yusheng, CAI Bin, et al. A review of energy transition analysis part two uncertainties and approaches [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 1-12.
- [8] 曹敏健,胡泽春,孟颖,等. 含抽蓄电站与新能源发电的柔性直流系统日前优化调度方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(15):36-44.  
CAO Minjian, HU Zechun, MENG Ying, et al. Day-ahead optimal dispatch method for flexible DC system with pumped storage hydropower plant and new energy power generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 36-44.
- [9] 陈磊,庄俊,王志远,等. 柔性直流输电系统的变速抽水蓄能机组直流电压辅助控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(4):154-162.  
CHEN Lei, ZHUANG Jun, WANG Zhiyuan, et al. Auxiliary control strategy of DC voltage for variable speed pumped storage units in an HVDC transmission system [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 154-162.
- [10] 李晓鹏,李岩,刘舒然,等. 基于可变速抽水蓄能技术提升区域电网新能源消纳水平的研究[J]. 智慧电力,2021,49(10):52-58,112.  
LI Xiaopeng, LI Yan, LIU Shuran, et al. Research on improving the new energy consumption level of regional power grid based on variable speed pumped storage technology [J]. Smart Power, 2021, 49(10): 52-58, 112.
- [11] 黄静梅,黄景光,吴巍. 含混合式抽蓄电站的梯级水电站效益问题研究[J]. 智慧电力,2022,50(1):75-81.  
HUANG Jingmei, HUANG Jingguang, WU Wei. Benefits of cascade hydropower stations with hybrid pumped storage power stations [J]. Smart Power, 2022, 50(1): 75-81.
- [12] 盛四清,孙晓霞. 利用风蓄联合削峰的电力系统经济调度[J]. 电网技术,2014,38(9):2484-2489.  
SHENG Siqing, SUN Xiaoxia. An economic dispatching strategy of peak load shifting by wind farm and pumped storage plant [J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2484-2489.
- [13] 夏沛,邓长虹,龙志君,等. 含抽水蓄能机组的风电消纳鲁棒机组组合[J]. 电力系统自动化,2018,42(19):41-49.  
XIA Pei, DENG Changhong, LONG Zhijun, et al. Robust unit commitment with pumped storage units for wind power accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 41-49.
- [14] 邹金,赖旭,汪宁渤. 以减少电网弃风为目标的风电与抽水蓄能协调运行[J]. 电网技术,2015,39(9):2472-2477.  
ZOU Jin, LAI Xu, WANG Ningbo. Mitigation of wind curtailment by coordinating with pumped storage [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2472-2477.
- [15] JAVED M S, ZHONG D, MA T, et al. Hybrid pumped hydro and battery storage for renewable energy based power supply system [J]. Applied Energy, 2020, 257: 114026.
- [16] 王博,詹红霞,张勇,等. 考虑风电不确定性的风蓄火联合优化经济调度研究[J]. 电力工程技术,2022,41(1):93-100.  
WANG Bo, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, et al. Combined optimal economic dispatch of wind-storage-fire considering wind power uncertainty [J]. Electric Power Engineering Tech-

- nology, 2022, 41(1):93-100.
- [17] 李军徽,周家旭,朱星旭,等. 含高渗透新能源电力系统中考虑变时段控制的火/储/荷日前优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(1):51-63.  
LI Junhui, ZHOU Jiaxu, ZHU Xingxu, et al. Day-ahead optimal dispatch of thermal/storage/load systems considering variable time period control in power system with high penetration of new energy[J]. Power System Technology, 2023, 47(1):51-63.
- [18] 梁子鹏,陈皓勇,雷佳,等. 考虑风电不确定度的风-火-水-气-核-抽水蓄能多源协同旋转备用优化[J]. 电网技术, 2018, 42(7):2111-2119, 2121.  
LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, LEI Jia, et al. A multi-source coordinated spinning reserve model considering wind power uncertainty[J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2111-2119, 2121.
- [19] 车泉辉,吴耀武,祝志刚,等. 基于碳交易的含大规模光伏发电系统复合储能优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3):76-82, 154.  
CHE Quanhui, WU Yaowu, ZHU Zhigang, et al. Carbon trading based optimal scheduling of hybrid energy storage system in power systems with large-scale photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3):76-82, 154.
- [20] 罗仕华,胡维昊,黄琦,等. 市场机制下光伏/小水电/抽水蓄能电站系统容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13):2792-2804.  
LUO Shihua, HU Weihao, HUANG Qi, et al. Optimization of photovoltaic/small hydropower/pumped storage power station system sizing under the market mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13):2792-2804.
- [21] 肖白,杨宇,姜卓,等. 风电-抽水蓄能联合系统中抽蓄电站容量的优化规划[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12):270-277.  
XIAO Bai, YANG Yu, JIANG Zhuo, et al. Optimal planning of capacity of pumped storage powerstation in wind power-pumped storage system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(12):270-277.
- [22] 程孟增,唐一金,商文颖,等. 风-光-火-抽蓄联合系统中抽水蓄能电站最佳容量配置[J]. 电力建设, 2021, 42(11):72-81.  
CHENG Mengzeng, TANG Yijin, SHANG Wenying, et al. Optimal capacity configuration of pumped-storage power station in wind-PV-fire-pump storage system[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11):72-81.
- [23] 蒋万泉,刘继春,韩晓言,等. 离网条件下考虑短时间尺度的水光蓄多能互补发电系统备用容量确定方法[J]. 电网技术, 2020, 44(7):2492-2502.  
JIANG Wanxiao, LIU Jichun, HAN Xiaoyan, et al. Reserve optimization for offline multi-energy complementary generation system in short time scale[J]. Power System Technology, 2020, 44(7):2492-2502.
- [24] DING H J, HU Z C, SONG Y H. Rolling optimization of wind farm and energy storage system in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5):2676-2684.
- [25] XIA S W, DING Z H, DU T, et al. Multi-time scale coordinated scheduling for the combined system of wind power, photovoltaic, thermal generator, hydro pumped storage and batteries[C]//2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Baltimore, MD, USA. IEEE, 2019:1-8.
- [26] 黄杨,胡伟,闵勇,等. 考虑日前计划的风储联合系统多目标协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28):4743-4751.  
HUANG Yang, HU Wei, MIN Yong, et al. Multi-objective coordinative dispatch for wind-storage combined systems considering day-ahead generation schedules[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28):4743-4751.
- [27] 林俐,岳晓宇,许冰倩,等. 计及抽水蓄能和火电深度调峰效益的抽蓄-火电联合调峰调用顺序及策略[J]. 电网技术, 2021, 45(1):20-32.  
LIN Li, YUE Xiaoyu, XU Bingqian, et al. Sequence and strategy of pumped storage-thermal combined peak shaving considering benefits of pumped storage and deep regulation of thermal power[J]. Power System Technology, 2021, 45(1):20-32.
- [28] 邵成成,冯陈佳,王雅楠,等. 含大规模清洁能源电力系统的多时间尺度生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19):6103-6113.  
SHAO Chengcheng, FENG Chenjia, WANG Yanan, et al. Multiple time-scale production simulation of power system with large-scale renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19):6103-6113.
- [29] ZHOU B R, GENG G C, JIANG Q Y. Hydro-thermal-wind coordination in day-ahead unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6):4626-4637.
- [30] 杜婷. 风光水火储联合系统多时间尺度协调调度研究[D]. 北京:华北电力大学, 2020.  
DU Ting. Research on multi-time scale coordinated scheduling of a combined system with wind-solar-thermal-hydro power and battery units[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2020.
- [31] 李湃,王伟胜,刘纯,等. 张北柔性直流电网工程新能源与抽蓄电站配置方案运行经济性评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24):7206-7214, 7447.  
LI Pai, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Economic assessment of Zhangbei VSC-based DC grid planning scheme with integration of renewable energy and pumped-hydro storage power station[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24):7206-7214, 7447.
- [32] DING H J, HU Z C, SONG Y H. Stochastic optimization of the daily operation of wind farm and pumped-hydro-storage plant[J]. Renewable Energy, 2012, 48:571-578.
- [33] 包宇庆,王蓓蓓,李扬,等. 考虑大规模风电接入并计及多时间尺度需求响应资源协调优化的滚动调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17):4589-4600.



BAO Yuqing, WANG Beibei, LI Yang, et al. Rolling dispatch model considering wind penetration and multi-scale demand response resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17):4589-4600.

- [34] 张刘冬,殷明慧,卜京,等. 基于成本效益分析的风电抽水蓄能联合运行优化调度模型[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3386-3392.

ZHANG Liudong, YIN Minghui, BU Jing, et al. A joint optimal operation model of wind farms and pumped storage units based on cost-benefit analysis[J]. Power System Technology, 2015, 39(12):3386-3392.

作者简介:



赵心怡

赵心怡(1998),女,硕士在读,研究方向为电力系统安全经济运行(E-mail: zxy18262623-901@163.com);

谢俊(1979),男,博士,教授,研究方向为现代电力系统安全经济运行、能源电力市场化运行机制、可再生能源发电与综合能源系统;

周翠玉(1999),女,硕士在读,研究方向为电力系统经济调度。

## A multi-time scale coordinated dispatching model of wind-photovoltaic-pumped storage zero-carbon power system

ZHAO Xinyi, XIE Jun, ZHOU Cuiyu, XING Shanxi

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** The volatility impact and insufficient level of new energy accommodation brought by the high proportion of new energy connected to the grid have become an urgent problem to be solved under the background of new type power system. Therefore, based on the characteristics that the increase of prediction accuracy of wind, photovoltaic power and load improves step by step with reduced time scales and the flexible regulation ability of pumped storage plant, a multi-time scale coordinated dispatching model of wind-photovoltaic-pumped storage zero-carbon power system is established. In order to minimize the cost of power generation, the power generation plans of day-ahead 24-hour, the intraday 1-hour and the real-time 15-minute are established. Through the coordination of multiple time scales, the wind power, photovoltaic power and pumped storage output track the load well, thus revising the power generation plan step by step. Taking the wind-photovoltaic-pumped storage zero-carbon power system with 6 pumped storage units as an example, the simulation analysis shows that the proposed multi-time scale coordinated dispatching model is conducive to reducing curtailment of wind and photovoltaic power, and the ability of power system to accommodate wind and photovoltaic power is related to the installed capacity of pumped storage plant.

**Keywords:** pumped storage plant; new energy accommodation; wind-photovoltaic-pumped storage zero-carbon power system; multi-time scale coordinated dispatching; prediction accuracy; power generation plan

(编辑 方晶)