

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190261

# 考虑多风能预测场景的虚拟电厂日内滚动柔性优化调度方法

罗翼婷<sup>1</sup>, 杨洪明<sup>2</sup>, 牛犇<sup>2</sup>, 常巩<sup>2</sup>, 孟科<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学经济与管理学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省电动交通与智能配网工程技术研究中心, 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 随着分布式可再生能源接入电网的比例日益提高, 其出力间歇性和随机性给电力系统的安全稳定和经济运行带来了一系列的负面影响, 虚拟电厂为分布式可再生能源可靠并网提供了新的途径。针对虚拟电厂中风电机组出力的不确定性及预测误差, 考虑了由多个风能预测服务商基于不同预测方法提供多个风电出力预测场景, 以期运行成本最小为目标, 制定虚拟电厂每个场景对应的最优调度计划。为应对风力状况的随机波动, 虚拟电厂当前时段考虑下一时段所有风电出力场景下的计划调整成本。并以期望运行总成本最小为目标, 构建基于多风能预测结果的虚拟电厂柔性优化调度模型, 并设计了日内虚拟电厂出力计划的滚动调度策略。通过数值仿真, 对比分析了不同预测场景下虚拟电厂的运行成本, 验证了所提模型的可行性和有效性。

**关键词:** 虚拟电厂; 风力发电; 不确定性; 柔性优化调度; 滚动策略联

## Day-ahead flexible rolling optimization dispatch of virtual power plant based on multi-wind forecasting results

LUO Yiting<sup>1</sup>, YANG Hongming<sup>2</sup>, NIU Ben<sup>2</sup>, CHANG Gong<sup>2</sup>, MENG Ke<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;  
2. Hunan Provincial Engineering Research Center of Electric Transportation and Smart Distribution Network, School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** With the increasing proportion of distributed renewable energy access to the power grid, the intermittent and stochastic output of power system has brought a series of negative effects on the safety, stability and economic operation, and the Virtual Power Plant (VPP) provides a new way for the reliable interconnection of distributed renewable energy sources. Aiming at the uncertainty and prediction error of the output of the stroke generator in the VPP, this paper considers that several wind power forecasting service providers provide a number of air power output prediction scenarios based on different forecasting methods, and the virtual plant sets the optimal scheduling plan for each scene with the goal of minimizing the expected operating cost. In response to random fluctuations in wind conditions, the current time slot of a VPP considers the planned adjustment costs under all wind power output scenarios in the next period. Aiming at the minimum total cost of expected operation, the flexible optimal scheduling model of VPP based on multi-wind energy prediction results is constructed, and the rolling scheduling strategy of the output plan of intraday VPP is designed. Through numerical simulation, the running cost of VPP under different prediction scenarios is compared and analyzed, and the feasibility and effectiveness of the proposed model are verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71420107027), Science and Technology Projects of Hunan Province (No. 2017CT5015 and No. 2017WK2053), Postgraduate Research and Innovation Project of Hunan Province (No. CX2017B465), and Strategic Emerging Industries Project in Hunan Province (No. 2018GK4002).

**Key words:** virtual power plant; wind power generation; uncertainties; flexible optimization dispatch; rolling strategies

## 0 引言

进入 21 世纪以来, 随着全球变暖、能源危机和

环境问题日益突出, 逐步改善能源结构, 大力发展风能、太阳能在内的可再生能源已成为当前的热点<sup>[1-3]</sup>。风力发电作为目前技术成熟, 且最具发展潜力的可再生能源发电方式之一, 与传统发电形式相比具有更长远的环境和经济效益, 受到了世界各国的广泛重视。

风力发电具有明显的随机性、波动性和间歇性

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(71420107027); 湖南省科技计划项目资助(2017CT5015, 2017WK2053); 湖南省研究生科研创新项目资助(CX2017B465, CX2018B525); 湖南省战略性新兴产业资助(2018GK4002)

特点, 风电功率预测存在明显的误差<sup>[4-7]</sup>。分布式风力发电机组并网后, 引起电力系统实时动态功率的不平衡, 给电力系统的安全运行带来严重威胁。虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)的提出为解决上述问题提供了全新的途径<sup>[8-10]</sup>。VPP 通过协调可再生能源发电机组(风光机组)、常规发电机组、储能单元以及可中断负荷的功率分配, 实现各种分布式电源(Distributed Generator, DG)的聚合管理, 参与电力市场交易和电力系统调度<sup>[11-12]</sup>, 从而提高可再生能源利用率以及需求侧管理的经济效益。

目前, 现有研究主要集中在 VPP 优化调度运行方面, 以实现运行效益最大化或成本最小化。文献[13]考虑电动汽车作为电源与负荷的双重特性, 建立了电动汽车参与下 VPP 环境成本和发电成本的多目标优化调度模型。文献[14]研究了计及需求响应的 VPP 优化调度, 通过对需求响应资源的聚合管理, 减少分布式可再生能源出力的波动性。文献[15]建立了包含风光发电机组、燃气轮机组、储能系统和激励型需求响应的虚拟电厂随机调度优化模型, 以实现最大的净收益。文献[16]考虑市场电价和风电出力的不确定性, 建立了考虑环境成本的 VPP 鲁棒竞标模型。文献[17]建立了含风电和光伏发电及水电的 VPP 协同调度模型, 并利用场景缩减技术形成经典场景处理随机优化问题。但上述研究基本忽略了风电功率预测误差的影响。

近年来, 为降低风电功率预测误差造成的影响, 滚动调度成为应对风电随机波动, 提高风电消纳能力的有效手段之一。文献[18]研究了风储联合发电系统多时间尺度有功调度模式, 提出了风储联合发电系统的滚动协调调度方法。文献[19]以机组调整成本及弃风量最小为目标, 提出了一种考虑机组优化选取的含风电电网滚动的优化调度方法。文献[20]基于协调优化的思想, 提出了一种风光储联合系统控制方法。文献[21]研究了热电联产与风电机组的滚动优化调度模型及算法。以上研究建立的优化模型均是基于单一风电预测结果进行滚动调度, 并未涉及调度周期内多个风电出力预测场景下, 系统运行计划的灵活选取及调整成本等问题。

在上述背景下, 为应对天气条件和风力状况的随机波动, 本文考虑了由多个风能预测服务商基于不同预测技术提供的不同风电场景, 每个场景对应一种系统最优运行计划。VPP 能在当前时段考虑出下一时段所有的风电出力场景, 且考虑其运行计划的调整。VPP 以调整运行总成本最小为目标, 从多个运行计划中选取下一时段的最优调度方案, 构建了含燃料机组、风电机组以及可控负荷的 VPP 柔性

优化调度模型。在此基础上, 设计了一种基于日前发电计划的滚动调度策略。最后, 通过算例仿真验证了所提模型的可行性和有效性。

## 1 VPP 日前柔性优化调度模式

### 1.1 VPP 框架

图 1 为虚拟电厂的一种典型结构框架, 主要包括分布式可再生能源机组、用户负荷(居民负荷、商业负荷、工业负荷、可控负荷等)、可调度分布式燃料机组、分布式储能设备(储能电池系统、电动汽车等)和控制协调中心。本文所采用的 VPP 由风电机组、燃料机组和可控负荷组成, 同时作为整体与大电网进行能量交互。

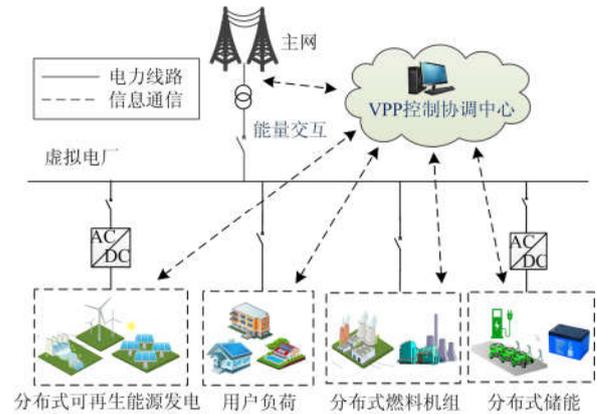


图 1 VPP 结构

Fig. 1 Architecture of VPP

### 1.2 VPP 日前柔性优化调度框架

针对虚拟电厂中风电机组出力的不确定性, 不同风能预测服务商考虑天气条件、基于不同预测方法和模型进行日前风电功率预测, 提供多个风电出力经典场景。通过以 VPP 运行成本最小为目标的优化调度, 每个场景对应一种系统出力的可行方案, 得到多种优化运行计划。在每个运行计划下, VPP 运行成本包括燃料机组发电成本、可控负荷功率调整成本以及 VPP 与电网之间联络线上的电能交互成本等。VPP 当前时段考虑下一时段所有的风电出力场景并进行运行计划的调整。一部分机组及可控负荷被重新调度, 产生调整运行成本。VPP 以调整运行总成本最小为目标, 从多个运行计划中选取下一时段的最优调度方案, 从而呈现出面对风电不确定性的运行柔性特征。以上述方法为基础, “柔性”可理解为与“刚性”、“硬性”相对, 即运行计划是在考虑调度周期内风力状况可能发生变化的情况下, 系统调整成本最小的计划安排。

假设三个独立的风能预测服务商分别提供

$S_1, S_2, S_3$  日前风电预测功率结果,  $O_1, O_2, O_3$  对应为候选运行计划。假设日前 0 时刻, 采用计划  $O_2$  作为 VPP 调度方案,  $t_c$  时刻实时风力状况发生变化时, 新的预测场景  $S'_1, S'_2, S'_3$  以及对应的  $O'_1, O'_2, O'_3$  运行计划生成。为应对天气条件的随机波动, 考虑将  $O_2$  转换为  $O'_1, O'_2, O'_3$  中调整成本最小的一种运行方案作为 VPP 日前运行计划。

本文提出的 VPP 日前柔性优化调度框架如图 2 所示, 主要包括以下步骤。

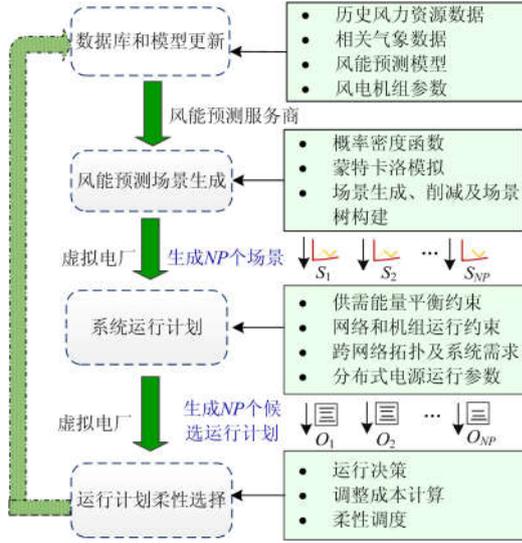


图 2 柔性优化调度框架

Fig. 2 Framework of flexible optimal scheduling

步骤 1: 不同风能预测服务商更新数据库(气象数据、风电场或风电机组数据)并进行模型系数设定(物理天气预报模型、机器学习统计模型)。

步骤 2:  $M$  个风能预测服务商分别利用预测技术预测出  $NP$  个场景<sup>[22]</sup>, 集合为  $\{S_1, S_2, \dots, S_{NP}\}$ 。每个场景对应不同的概率, 所有场景发生概率之和为 1。

步骤 3: 针对每个场景下的风能预测结果  $\{S_1, S_2, \dots, S_{NP}\}$ , VPP 分别制定运行计划, 集合记为  $\{O_1, O_2, \dots, O_{NP}\}$ 。

步骤 4: 从  $O_1, O_2, \dots, O_{NP}$  多个备选计划中选出期望调整成本最小的运行计划, 作为 VPP 下一时段的调度方案。

## 2 VPP 日前柔性优化调度方法

### 2.1 单个预测场景下的 VPP 优化调度模型

#### 2.1.1 运行优化目标

单个风电预测出力场景下, 以 VPP 运行成本成本最小为目标, 目标函数为

$$\min C_{\text{total}}^S = C_u + C_f + C_b \quad (1)$$

1) 燃料机组发电成本  $C_u$

$$C_u = \sum_{i=1}^{NT} \sum_{s=1}^{NG} [C_i(P_{i,s}^t) + C_{Ui} + C_{Di}] \quad (2)$$

$$C_i(P_{i,s}^t) = \gamma_i^t [a_i (P_{i,s}^t)^2 + b_i P_{i,s}^t] \quad (3)$$

$$C_{Ui}^t = \gamma_i^t (1 - \gamma_i^{t-1}) \left[ \alpha_i + \beta_i \left( 1 - \exp \frac{X_{i,t}^{\text{off}}}{\tau_i} \right) \right] \quad (4)$$

$$C_{Di}^t = \gamma_i^{t-1} (1 - \gamma_i^t) C_{SD} \quad (5)$$

式中:  $C_u$  为小型火电机组、微型燃气轮机、柴油发电机等常规机组的发电成本;  $NT$  为一个调度周期内总时段数;  $NG$  为总机组数;  $\gamma_i^t$  为机组  $i$  在时刻  $t$  的状态, 0 表示机组停机, 1 表示机组开机;  $C_i(P_{i,s}^t)$  为机组  $i$  在时刻  $t$  的燃料成本;  $P_{i,s}^t$  为机组  $i$  在时刻  $t$  的有功出力;  $a_i, b_i$  为机组  $i$  的发电成本系数;  $C_{Ui}^t$  为机组  $i$  在时刻  $t$  的启动成本;  $\alpha_i, \beta_i$  分别为机组  $i$  的固定成本和冷启动成本;  $\tau_i$  为机组  $i$  的冷却速度的时间常数;  $X_{i,t}^{\text{off}}$  为机组  $i$  连续停机时间;  $C_{Di}^t$  为机组  $i$  在时刻  $t$  的关机成本;  $C_{SD}$  为固定常数。

2) 可控负荷成本  $C_f$

VPP 购买用户侧负荷进行功率调整, 终端用户获得补偿费用。可控负荷成本为<sup>[23]</sup>

$$C_f = \sum_{t=1}^{NT} \left[ a_{\text{cut}} (P_{\text{cut},s}^t)^2 + b_{\text{cut}} P_{\text{cut},s}^t \right] u_{\text{cut}}^t \quad (6)$$

式中:  $a_{\text{cut}}, b_{\text{cut}}$  为可控负荷补偿系数;  $P_{\text{cut},s}^t$  为时刻  $t$  的负荷中断量;  $u_{\text{cut}}^t$  为时刻  $t$  负荷削减状态变量, 负荷被削减则置 1, 否则置 0。

3) 电能交互成本  $C_b$

VPP 与电网之间通过联络线连接, 存在功率的双向流动。功率从电网注入 VPP 时, 形成电能购买成本; 功率从 VPP 注入电网时, 形成回馈电能收益。为此, 电能交互成本包括电能购买成本与回馈电能收益两部分, 即

$$C_b = \sum_{t=1}^{NT} [\rho_b^t \cdot P_{\text{in},s}^t - \rho_e^t \cdot P_{\text{out},s}^t] \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{in},s}^t$  为时刻  $t$  从电网注入 VPP 的功率;  $P_{\text{out},s}^t$  为时刻  $t$  从 VPP 注入电网的功率;  $\rho_b^t$  和  $\rho_e^t$  分别为时刻  $t$  时 VPP 向电网进行购/售电的实时价格。

2.1.2 运行约束条件

1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{NG} \gamma_i^t P_{i,s}^t + \sum_{w=1}^{NH} P_{w,s}^t = P_D(t) \quad (8)$$

$$P_D'(t) = P_D(t) + P_{\text{loss}}(t) - u_{\text{cut}}^t P_{\text{cut},s}^t \quad (9)$$

式中:  $P_{w,s}^t$  为风电机组  $w$  在时刻  $t$  的预测出力;  $P_D(t)$  为时刻  $t$  的 VPP 系统总负荷;  $P_{\text{loss}}(t)$  为时刻  $t$  的线路损耗。

2) 燃料机组出力上下限约束

$$P_i^{\min} \gamma_i^t \leq P_{i,s}^t \leq P_i^{\max} \gamma_i^t \quad (10)$$

式中,  $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$  分别为机组  $i$  的出力下限和上限。

3) 燃料机组爬坡速率约束

$$\begin{cases} P_i(t) - P_i(t-1) \leq \gamma_i^{t-1} R_i^{\text{up}} + (1 - \gamma_i^{t-1}) P_i^{\max} \\ P_i(t-1) - P_i(t) \leq \gamma_i^t R_i^{\text{down}} + (1 - \gamma_i^t) P_i^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $R_i^{\text{up}}$ 、 $R_i^{\text{down}}$  分别为机组  $i$  的最大向上、向下爬坡速率。

4) 燃料机组最小启停时间约束

$$\begin{cases} (X_{i,t}^{\text{on}} - M_i^{\text{on}}) \cdot (\gamma_i^{t-1} - \gamma_i^t) \geq 0 \\ (X_{i,t}^{\text{off}} - M_i^{\text{off}}) \cdot (\gamma_i^t - \gamma_i^{t-1}) \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $M_i^{\text{on}}$ 、 $M_i^{\text{off}}$  分别为机组  $i$  的最小开机时间和最小停机时间;  $X_{i,t}^{\text{on}}$ 、 $X_{i,t}^{\text{off}}$  分别为机组  $i$  在时刻  $t$  的连续开机时间和连续停机时间。

5) 风电机组出力上下限约束

$$0 \leq P_{w,s}^t \leq P_{w,f}^t \quad (13)$$

式中,  $P_{w,f}^t$  为时刻  $t$  风电的最大预测出力。

6) 可削减负荷量约束

$$0 \leq P_{\text{cut},s}^t \leq P_{\text{LL}}^{\max} \quad (14)$$

式中,  $P_{\text{LL}}^{\max}$  为可控负荷的最大切除量。

7) 联络线传输功率约束

$$-F_l^{\max} \leq F_l(t) \leq F_l^{\max} \quad (15)$$

式中,  $F_l^{\max}$  为联络线的最大传输功率限值;  $F_l(t)$  为联络线在时刻  $t$  输送的有功功率。

## 2.2 多个预测场景下 VPP 柔性优化调度模型

$M$  个风能预测服务商提供  $NP$  个风电出力预测场景  $S_1, S_2, \dots, S_{NP}$ , 每个场景对应一种 VPP 优化运行计划  $O_1, O_2, \dots, O_{NP}$ 。假设在时间  $t \in [0, t_c]$  内, VPP 的运行计划方案为  $O_x (x=1, 2, \dots, NP)$ 。为适应  $t_c$  时刻天气出现的波动, 需调整运行计划。  $[t_c, t_{c+1}]$  为系统从  $O_x$  转换到  $O_z$  的过程持续时间区间,  $[t_c + 1, NT]$  时间区间内 VPP 的运行计划方案为  $O_z (z=1, 2, \dots, NP)$ 。VPP 在  $[0, NT]$  内的运行计划调整过程分为 Part A、Part B 和 Part C 三部分, 如表 1

所示。

VPP 从一个场景转换到另一场景的运行总成本由调整成本和运行成本两部分组成, 即

$$C_{\text{total}}(O_x, O_z, t_c) = C_B(O_x, O_z, t_c) + C_C(O_z, t_c) \quad (16)$$

式中:  $C_B(O_x, O_z, t_c)$  为  $t \in [t_c, t_c + 1]$  时段运行计划  $O_x$  调整至  $O_z$  的系统调整成本;  $C_C(O_z, t_c)$  为计划  $O_z$  在  $t \in [t_c + 1, NT]$  时段的运行成本。

表 1 VPP 运行计划调整过程

Table 1 Parts of VPP operation plan			
部分	时段	运行计划	成本
Part A	$t \in [0, t_c]$	$O_x$	$C_A(O_x, t_c)$
Part B	$t \in [t_c, t_c + 1]$	$O_x$ 到 $O_z$	$C_B(O_x, O_z, t_c)$
Part C	$t \in [t_c + 1, NT]$	$O_z$	$C_C(O_z, t_c)$

考虑所有可能场景的发生概率, 系统从  $O_x$  调整到  $O_z$  的所有转换路径, VPP 期望运行总成本为

$$FC = \sum_{z=1}^{NP} [\rho_z \times C_{\text{total}}(O_x, O_z, t_c)] \quad (17)$$

式中:  $\rho_z$  为场景  $S_z$  的发生概率;  $FC$  是 VPP 期望运行总成本。

在 VPP 柔性调度决策中,  $r_{x,z}$  表示两个相邻时段间运行计划的调整路径, 所有调整路径的集合为

$$R = \{r_{1,1}, r_{2,1}, \dots, r_{NP,1}, \dots, r_{1,NP}, r_{2,NP}, \dots, r_{NP,NP}\}$$

假设  $S_H$ 、 $S_M$ 、 $S_L$  代表同一时段高、中、低三种风电预测的出力水平,  $O_H$ 、 $O_M$ 、 $O_L$  为 VPP 系统对应的优化运行计划。此情形下可能出现 9 种运行计划调整路径, 如图 3 所示。

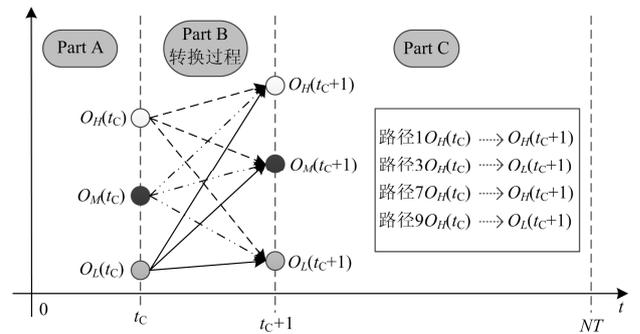


图 3 相邻时段运行计划调整路径

Fig. 3 Transition routes between two adjacent time intervals

VPP 在  $t_c$  时刻从运行计划  $O_1, O_2, \dots, O_{NP}$  中选择期望运行总成本最小的计划作为下一时段的柔性调度计划方案, 其优化模型为

$$\min_{FC} = \sum_{z=1}^{NP} [\rho_z \times C_{\text{total}}(O_x, O_z, t_c)] \quad x=1, 2, \dots, NP \quad (18)$$

### 3 考虑多预测场景的 VPP 日内柔性滚动优化调度

滚动时域方法(Receding Horizon Procedure)是指在有限时域内根据设定周期进行滚动优化的方法, 基于当前状态和系统模型, 随时间推移动态更新未来调度周期内的预测信息和运行状态, 在当前滚动窗口内重新优化, 执行调度决策结果<sup>[24]</sup>。通过及时跟踪运行状态动态调整系统方案, 来保证调度策略的最优性。滚动式优化调度比一次性优化调度具有更好的鲁棒性和适用性, 可以降低系统建模、外部干扰、预测误差等引起的不确定性及其对调度结果的影响。

风电出力的随机波动性较大, 且预测误差随时间区间变长而逐渐增加。在日前计划安排中, VPP 仍面临着较大的调度不确定性。为此, 本文提出了 VPP 日前滚动调度计划决策模式, 如图 4 所示。

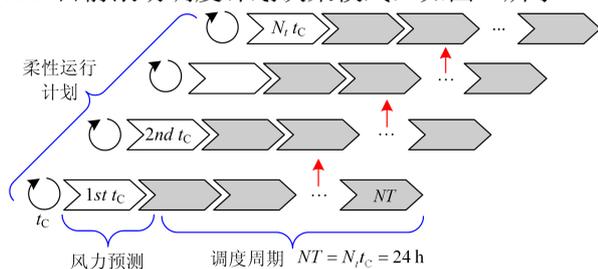


图 4 滚动式调度决策过程

Fig. 4 Decision model of rolling dispatch

$M$  个风能预测服务商分别以  $t_c$  时段(如 1 h)为间隔实时滚动更新调度周期  $NT$  内的风电功率预测信息。VPP 在当前时刻以多风电出力预测结果为基础, 根据式(18)确定柔性调度计划。并根据后续阶段多风电出力预测结果的滚动更新, VPP 通过修正机组启停时间和功率以及可控负荷的中断功率, 优化系统运行成本, 依次及时滚动调整日内柔性调度方案。针对图 3 给出的可能预测场景, VPP 执行日内滚动柔性调度决策, 如图 5 所示, 其中蓝线给出了 VPP 联络线功率的最优出力安排。

### 4 模型求解

基于多风能预测结果的 VPP 日前柔性优化调度模型式(18)可分为两阶段优化问题进行求解。第 1 阶段优化模型负责求解单个风电预测场景下的 VPP 优化问题式(1)一式(15), 其中决策变量为时刻  $t$  常规燃料机组功率、可控负荷的中断功率和联络线上的交互功率。第 2 阶段优化模型负责求解多个风电预测场景下的 VPP 运行计划调整方案, 其决策变量为  $O_x$ 。

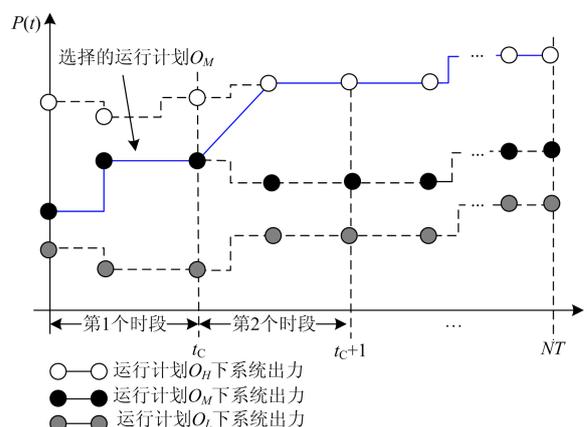


图 5 VPP 日内滚动柔性调度决策及联络线功率出力  
Fig. 5 VPP day-ahead rolling flexible operation decision and its tie line power output

分支定界法是一种求解非凸混合整数非线性规划问题的有效方法。而 BMIBNB Global Solver 是基于分支定界法, 针对非凸优化问题开发的一种求解器。本文通过 Matlab 调用 BMIBNB Global Solver 对所构造的优化模型式(1)一式(18)进行求解。

### 5 算例分析

#### 5.1 参数设置

设置 VPP 系统由 1 个小型风电场、4 台燃料发电机组和 1 个可中断负荷用户组成, 验证了本文所提出的模型和算法的有效性。风电机组额定功率为 1.2 MW, 切入、切出及额定风速分别为 4 m/s、25 m/s 和 16 m/s; 可控负荷最大中断功率  $F_l^{\max}$  为 200 kW, 可中断负荷补偿系数  $a_{\text{cut}}$  和  $b_{\text{cut}}$  分别为 0.1 和 1.3, VPP 与电网之前的购/售电价格及对应时段见表 2, 常规燃料机组参数见表 3。

本文以  $NT = 24$  h 为调度周期, 调度间隔的时间越短, 系统调度计划的精确性越高, 但同时也增加了系统调度次数和计算量。本文选取调度间隔为 6 h 来执行柔性滚动优化调度计算。若需要提高调度精度, 可以缩短调度间隔, 所提出的方法仍然有效。

图 6 为 VPP 系统负荷需求曲线。本文采用 3 个风能预测商进行功率预测, 生成了 A、B、C 三种风能预测场景, 为了便于显示计算结果, 设场景

表 2 电价参数

Table 2 Parameters of price

时段	分时时段	购电电价/ (元/度)	售电电价/ (元/度)
峰时段	10:00—15:00 9:00—22:00	1.39	1.18
谷时段	00:00—07:00 23:00—24:00	0.41	0.28
平时段	一天剩余时段	0.68	0.52

表 3 机组参数

Table 3 Parameters of units				
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4
$P_i^{\min}/\text{kW}$	500	800	1 500	1 100
$P_i^{\max}/\text{kW}$	120	200	400	245
$a_i$	0.02	0.02	0.01	0.01
$b_i$	6.6	7.15	9.2	8.5
$M_i^{\text{on}}/\text{h}$	1.5	2	4	3
$M_i^{\text{off}}/\text{h}$	1.5	2	3	3
$c_{U_i}$	52	60	85	70
$c_{D_i}$	52	60	85	70

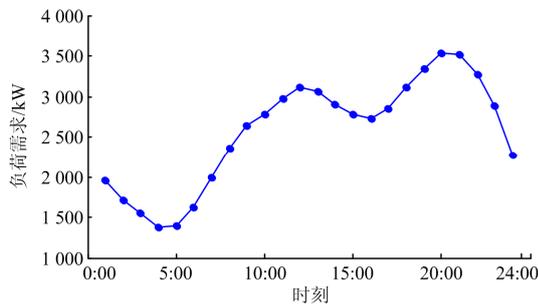


图 6 VPP 系统负荷曲线

Fig. 6 Load demand of VPP system

A、B、C 分别代表同时段高、中、低三种风电预测场景，并且所有场景发生的概率相同。日前初始时段三种场景下的风电功率预测结果如图 7 所示。

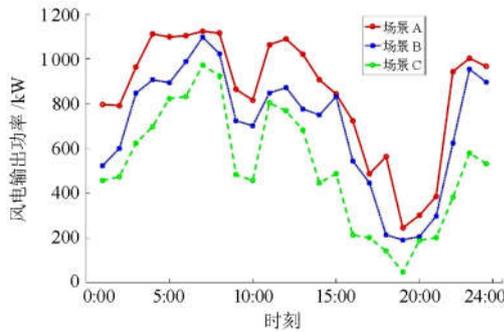


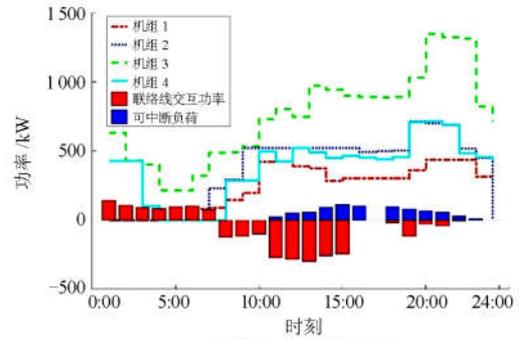
图 7 三种场景下初始时段风电功率曲线

Fig. 7 Initial time period wind power output under three scenarios

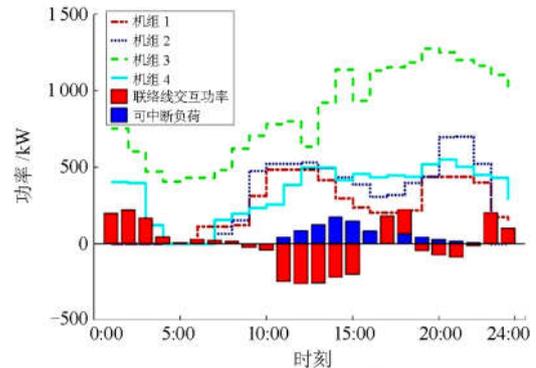
### 5.2 优化调度结果分析

求解每个风能预测场景下的 VPP 系统优化调度计划，A、B、C 三种场景下一天 24 h 机组出力、可中断负荷和联络线交互功率的仿真结果如图 8 所示。

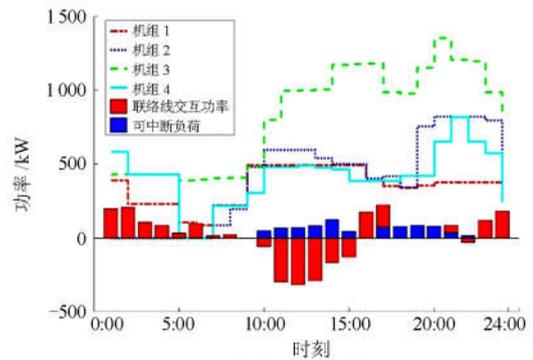
通过计算可得，三种场景下 VPP 的运行成本分别为：A 场景运行成本 486 395.67 元，B 场景运行成本 491 413.89 元，C 场景运行成本 483 653.11 元。假设三种场景是等概率发生的，考虑风电功率变化所造成的 VPP 计划调整，执行 VPP 柔性调度决策。



(a) 场景 A 的仿真结果



(b) 场景 B 的仿真结果



(c) 场景 C 的仿真结果

图 8 三种场景下的 VPP 调度方案

Fig. 8 Simulation results of VPP of three scenarios

根据式(17)计算出相邻场景间运行计划的调整成本，调度决策结果见表 4。为此，确定选取期望运行总成本最小的计划 C 作为 VPP 日前时刻 0:00 的柔性优化调度方案。

第一个时段(0:00—6:00)内实时更新风电功率预测结果，预测结果变化为 A'、B'、C'。表 5 给出了第一个时段(0:00—6:00)的柔性计划调整成本。由于系统从计划 C 调整到计划 B' 的期望运行总成本最小，为此选取计划 B' 作为时刻 6:00 的 VPP 运行调度计划。第二个时段(6:00—12:00)内实时更新风电功率预测结果，预测结果变化为 A''、B''、C''。表 6 给出了时段(6:00—12:00)柔性调度决策过程中

的调整成本和期望运行总成本。从计划B"调整到计划C"的期望运行总成本最小, 为此选取计划A"作为12:00的VPP运行调度计划。依次类推, 完成一天24h的滚动柔性优化调度。

表4 日前0:00的柔性调度决策

Table 4 Day-ahead flexible scheduling decision at 0:00

初始运行计划	调整路径	单一场景下	VPP 期望
		VPP 运行成本/元	运行总成本/元
A	A → A	486 395.67	
	A → B	498 577.25	489 098.11
	A → C	482 321.42	
B	B → A	488 866.31	
	B → B	491 413.89	488 769.42
	B → C	486 028.07	
C	C → A	492 352.79	
	C → B	489 033.74	488 346.54
	C → C	483 653.11	

表5 时段(0:00—6:00)柔性调度决策

Table 5 Flexible scheduling decision during 0:00—6:00

初始运行计划	调整路径	单一场景下	VPP 期望
		VPP 运行成本/元	运行总成本/元
C	C → A' → A'	43 717.54	
	C → A' → B'	42 164.42	44 299.93
	C → A' → C'	47 017.84	
	C → B' → A'	44 269.51	
	C → B' → B'	41 362.39	43 693.23
	C → B' → C'	45 447.81	
	C → C' → A'	44 993.71	
	C → C' → B'	43 573.07	45 011.98
	C → C' → C'	46 469.17	

表6 时段(6:00—12:00)柔性调度决策

Table 6 Flexible scheduling decision during 6:00—12:00

初始运行计划	调整路径	单一场景下	VPP 期望	
		VPP 运行成本/元	运行总成本/元	
B'	B' → A" → A"	101 873.11		
	B' → A" → B"	92 965.17	97 356.31	
	B' → A" → C"	97 230.61		
	B' → B" → A"	97 532.81		
	B' → B" → B"	91 172.07	94 674.52	
	B' → B" → C"	95 318.67		
	B' → C" → A"	96 753.79		
	B' → C" → B"	91 782.66	94 541.73	
		B' → C" → C"	94 818.74	

## 5.2 不同计划下 VPP 运行成本比较

基于实时更新的风电功率和滚动调度策略, 得

到VPP一天24h的运行调度安排。图9给出1天24h四个时段对应的单预测场景下运行计划和考虑多预测场景下的柔性运行计划的VPP成本。从图9可以看出, 在个别时段内, 柔性运行计划比单预测场景下运行成本高, 但VPP在调度周期24h内的总运行成本最低。为此, VPP滚动柔性调度以多风能预测商提供的不同预测结果为基础, 综合考虑了不同场景下运行计划的调整成本, 以减少风电预测误差造成的影响, 提高风能资源利用率, 以及VPP系统的运行经济性。

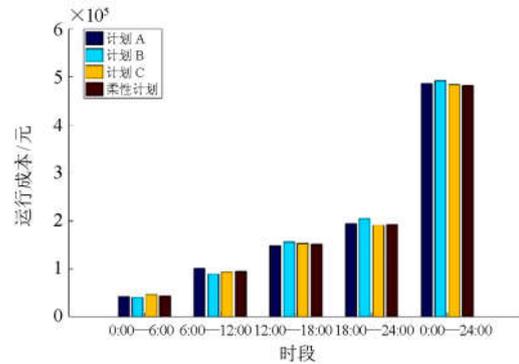


图9 运行成本比较

Fig. 9 Operation cost comparison

## 6 结论

针对由燃料机组、风电机组以及可控负荷组成的虚拟电厂, 本文建立了考虑多风能预测场景的柔性优化调度模型, 并设计了一种基于日前出力计划的滚动调度方案。算例结果分析表明, 所提出的滚动柔性优化调度方法能够有效减少天气变化和风能预测误差对VPP系统运行经济性的影响, 对于风向和风速多变场景下的VPP运行更为适用。本文所提出的模型还可以进一步扩展处理VPP中光伏发电功率、负荷功率等其他不确定性因素, 提出类似的滚动柔性调度方法。

## 参考文献

- [1] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [2] 张兴平, 刘文峰. 典型国家可再生能源政策演变研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(10): 60-68.  
ZHANG Xingping LIU Wenfeng. The evolution of renewable energy policy in typical countries[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(10): 60-68.
- [3] 赵文会, 李阮, 付强. 能源互联网下可再生能源项目规划研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 142-148, 156.  
ZHAO Wenhui, LI Ruan, FU Qiang. Research on renewable energy project planning under energy internet[J]. Power

- System and Clean Energy, 2018, 34(2): 142-148, 156.
- [4] 叶晨, 崔双喜, 王维庆. 含风电的电力系统概率潮流计算[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 167-172.  
YE Chen, CUI Shuangxi, WANG Weiqing. Probabilistic load flow calculation for power grid containing wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(2): 167-172.
- [5] 付兵彬, 万小花, 熊小伏, 等. 基于风速时间周期特征的风电并网系统风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 43-50.  
FU Bingbin, WAN Xiaohua, XIONG Xiaofu, et al. Risk assessment of wind power integrated system based on time-periodic characteristics of wind speed[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 43-50.
- [6] 陈好杰, 程浩忠, 徐国栋, 等. 基于云理论的风电场群长期出力区间预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 110-117.  
CHEN Haojie, CHENG Haozhong, XU Guodong, et al. Interval prediction for long-term wind power of wind farm clusters based on cloud theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 110-117.
- [7] 杨杰, 霍志红, 何永生, 等. 基于小波与最小资源分配网络的超短期风电功率预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 55-61.  
YANG Jie, HUO Zhihong, HE Yongsheng, et al. Ultra-short-term wind power prediction based on wavelet and minimum resource allocation network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 55-61.
- [8] KUMAGAI J. Virtual power plants, real power[J]. IEEE Spectrum, 2012, 49(3): 13-14.
- [9] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.  
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [10] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103-5111.  
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5103-5111.
- [11] 易德鑫. 计及风电出力不确定性的虚拟电厂随机优化调度[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.  
YI Dexin. Virtual power plant stochastic optimal dispatch considering uncertain outputs from wind generators[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013.
- [12] GAO Yajing, XUE Fushen, YANG Wenhai, et al. Optimal operation modes of photovoltaic-battery energy storage system based power plants considering typical scenarios[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 397-406. DOI: 10.1186/s41601-017-0066-9.
- [13] 罗捷, 吴俊明, 陈德超, 等. 电动汽车参与下的虚拟电厂多目标优化调度[J]. 电力科学与工程, 2015(2): 50-54.  
LUO Jie, WU Junming, CHEN Dechao, et al. Multi-objective optimization scheduling of virtual power plant with electric vehicles[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015(2): 50-54.
- [14] 夏榆杭, 刘俊勇, 冯超, 等. 计及需求响应的虚拟发电厂优化调度模型[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1666-1674.  
XIA Yuhang, LIU Junyong, FENG Chao, et al. Optimal scheduling model of virtual power plant considering demand response[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1666-1674.
- [15] 徐辉, 焦扬, 蒲雷, 等. 计及不确定性和需求响应的风光燃储集成虚拟电厂随机调度优化模型[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3590-3597.  
XU Hui, JIAO Yang, PU Lei, et al. Stochastic scheduling optimization model for virtual power plant of integrated wind-photovoltaic-energy storage system considering uncertainty and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3590-3597.
- [16] 余爽, 卫志农, 孙国强, 等. 考虑不确定性因素的虚拟电厂竞标模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 43-49.  
YU Shuang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. A bidding model for a virtual power plant considering uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 43-49.
- [17] 邹云阳, 杨莉. 基于经典场景集的风光水虚拟电厂协同调度模型[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1855-1859.  
ZOU Yunyang, YANG Li. Synergetic dispatch models of a wind/PV/hydro virtual power plant based on representative scenario set[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1855-1859.
- [18] 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.
- [19] 王功臣, 邓长虹, 夏沛, 等. 考虑机组优化选取的含风

- 电网滚动优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 37(11): 55-60.
- WANG Gongchen, DENG Changhong, XIA Pei, et al. Rolling optimization dispatching method of power grid containing wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 37(11): 55-60.
- [20] 戚永志, 刘玉田. 风光储联合系统输出功率滚动优化与实时控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 265-273.
- QI Yongzhi, LIU Yutian. Output power rolling optimization and real-time control in wind-photovoltaic-storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 265-273.
- [21] 宋卓然, 赵琳, 张子信, 等. 热电联产与风电机组联合运行滚动优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 110-116.
- SONG Zhuoran, ZHAO Lin, ZHANG Zixin, et al. Rolling optimal model for multiple heating source and wind turbine unit[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 110-116.
- [22] PAPPALA V S, ERLICH I, ROHRIG K, et al. A stochastic model for the optimal operation of a wind-thermal power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 940-950.
- [23] 艾欣, 周树鹏, 赵阅群. 含虚拟发电厂的电力系统优化运行与竞价策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6351-6362.
- AI Xin, ZHOU Shupeng, ZHAO Yuequn. Research on optimal operation and bidding strategy of power system with virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6351-6362.
- [24] CAMACHO E F, BORDONS C. Distributed model predictive control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2015, 22(1): 44-52.

收稿日期: 2019-03-31; 修回日期: 2019-06-11

作者简介:

罗翼婷(1985—), 女, 博士研究生, 研究方向为虚拟电厂、能源互联网; E-mail: luoyiting17@gmail.com

杨洪明(1972—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场、能源互联网; E-mail: yhm5218@163.com

牛 犇(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为虚拟电厂、新能源发电技术。E-mail: 1845510066@qq.com

(编辑 许 威)