

考虑预测误差的风火协调滚动调度

李志伟¹,赵书强¹,董凌²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,河北 保定 071003;2. 国网青海省电力公司,青海 西宁 810000)

摘要:在风电大规模接入电力系统的背景下,建立基于机会约束相关机会目标规划的电力系统滚动优化调度模型。考虑风电功率预测误差对调度模型功率平衡方程的影响,建立基于相关机会规划的功率平衡模型,将功率平衡的等式约束转化为最大化随机事件发生概率的目标函数。考虑风电功率预测误差“近小远大”的特点,确定系统旋转备用容量不同时刻机会约束条件的置信水平,并设计A_{III}段→B_{II}段→C_I段多次覆盖、逐次修改的滚动调度模式。为了实现模型的快速求解,引入目标规划将所建多目标优化模型转化为单目标优化模型。算例仿真验证了所建模型的有效性,所建模型能根据未来较长时段的风电和负荷情况进行预先调整,提高可再生能源的消纳能力。

关键词:电力系统;滚动调度;机会约束规划;相关机会规划;风电

中图分类号:TM 614;TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202011015

0 引言

风电大规模开发利用是实现我国能源战略转型的重大举措。但风电出力具有强不确定性,随着装机规模的增加,其消纳矛盾日益凸显。2019年上半年全国弃风电量为 1.05×10^{10} kW·h,全国平均弃风率为4.7%,其中新疆、甘肃和内蒙古弃风率分别为17%、10.1%和8.2%^[1]。提高电网消纳能力、减少弃风电量,是当前形势下风电发展的一个关键任务。

在现有技术条件下,风电功率预测一直存在较大误差,这是阻碍其消纳的关键因素之一。研究结果显示,较短的预测时间尺度也会带来较小的预测误差^[2]。基于滚动更新的风电超短期预测功率进行电力系统滚动调度被认为可以提高风电消纳能力。滚动调度本质上是基于模型预测控制MPC(Model Predictive Control)理论,利用不断更新的边界信息进行连续优化^[3],近年来在含风电的电力系统调度中多有应用。

文献[4]提出多时间尺度协调的有功调度模式,滚动修正机组未来时段出力,以保证系统运行的安

全性和经济性。文献[5-6]针对滚动调度的高效算法进行研究。文献[7]以“时序递进、滚动协调和消纳风电最大化”为原则,提出一种含大规模风电的电力系统多尺度滚动协调调度方法。文献[8]在电量完成进度和风电消纳成本控制的基础上,提出日内发电计划滚动模式,针对机组电量完成情况滚动修正剩余时段机组目标电量,并在模型中增加风电消纳成本约束。文献[9]建立日前、滚动和实时3个时间尺度的调度模型,利用最新电、热负荷和风电功率预测信息滚动修正剩余时段日前计划。文献[10]综合考虑需求响应资源的多时间尺度特性,针对风电预测精度日前、日内和实时逐步提高的特点,提出基于场景的随机规划和基于机会约束的随机规划相结合的滚动调度模型。以上研究针对风电和负荷在不同预测时间尺度下精度不同的情况,在长时间尺度上制定考虑全局最优的经济性调度方案,随着预测精度的提高,参照原调度计划在短时间尺度上滚动制定新调度计划对原调度计划进行分段“覆盖”,但未关注预测误差随预测超前时间的变化,也没有考虑预测误差对调度模型功率平衡方程的影响。文献[11]在建模时考虑预测超前时间对预测误差的影响,提出场景法和区间优化相结合的混合调度模型。在调度方案的近点预测误差较小,模型采用场景法,在调度方案的远点预测误差较大,模型采用区间优化,但没有考虑预测误差对调度模型功率平衡方程的影响。文献[12]将含有预测误差随机变量的功率平衡方程表示为电源满足负荷功率要求的机会约束条件,在此基础上建立考虑风电特性的风火协调滚动调度模型,但该处理模式容易导致较大的弃风功率。

基于此,本文考虑预测超前时间对预测误差的影响和预测误差对功率平衡方程的影响,建立基于

收稿日期:2020-02-09;修回日期:2020-09-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902200);国家电网公司科技项目(5228001700CW);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020MS091);河北省自然科学基金资助项目(E2020502066);国网河北省电力有限公司项目(SGHEDK00DYJS2000145)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902200), the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(5228001700CW), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2020MS091), the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2020502066) and the Program of State Grid Hebei Electric Power Co.,Ltd.(SGHEDK00DYJS2000145)

机会约束相关机会目标规划的电力系统风火协调滚动调度模型。首先,分析风电预测超前时间对预测误差的影响以及由此带来的对调度模型的影响;其次,分析预测误差对调度模型功率平衡方程的影响;然后,综合以上2点分析,建立考虑风电功率预测误差特性和预测误差对功率平衡方程影响的基于机会约束相关机会目标规划的风火协调滚动调度模型;最后,通过算例分析验证本文所提模型的有效性。

1 不同预测超前时间风电预测误差的分布特性及其对电力系统调度模型的影响

风电出力的不确定性是影响其大规模消纳的关键因素,表现为功率预测存在较大的预测误差。风电预测误差受天气、地形、预测模型等多种因素影响^[13]。定义预测时刻与被预测时刻的时间差为预测超前时间,则可以基于历史数据研究预测超前时间对风电预测误差分布的影响。美国BPA(Bonneville Power Administration)^[14]2016至2017年风电不同预测超前时间预测误差统计如图1所示。

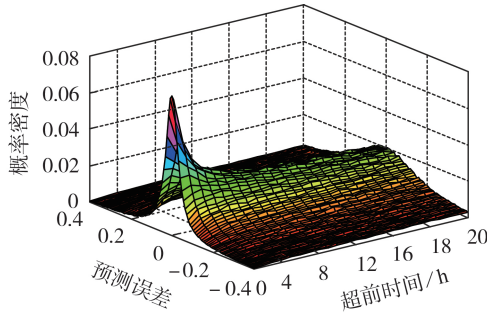


图1 不同预测超前时间预测误差分布

Fig.1 Forecast error distribution of different advanced forecast time

由图1可知,预测超前时间对风电预测误差分布的影响显著。靠近预测时刻的风电预测误差较小,随着预测超前时间的增长,风电预测误差有增大的趋势,即预测误差随预测超前时间呈现“近小远大”的规律。此外,这种差异在预测超前时间较短时比较明显,随着预测超前时间的增长这种差异越来越不明显。

随着风电渗透率的提高,电力系统风电接入节点注入功率的不确定性越来越大^[15]。在新形势下,基于传统确定性调度模型结合不同的不确定性处理方式,发展出一系列不确定优化调度模型。各种不确定调度模型的一个核心内容就是为系统预留恰当的旋转备用容量,平衡不确定性功率高渗透率下电力系统运行的安全性与经济性^[16-17]。分析图1可知,风电预测误差随预测超前时间呈现“近小远大”的特点。因此,可以充分利用这一点来指导调度模型精细化地配置旋转备用容量。如图2所示,若以

相同置信水平安排各时刻系统旋转备用容量,则预测超前时间较长的调度方案末端需更多的旋转备用容量,此外,在滚动调度中,预测超前时间较长的调度方案还未被执行就被新的调度方案所覆盖,因此预留更多的旋转备用容量损失了方案的经济性。

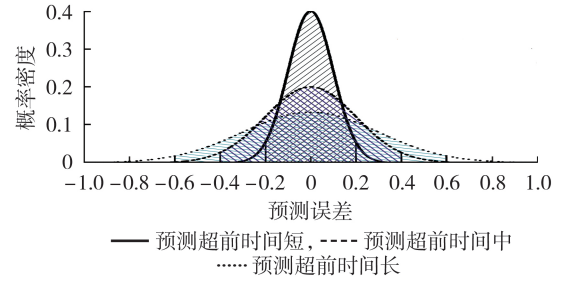


图2 不同预测超前时间同一置信水平下的预测误差区间

Fig.2 Forecast error interval of different advanced forecast time at same confidence level

为解决这一问题,本文系统备用容量约束采用机会约束条件,且随预测超前时间的不同,设置不同的置信水平:预测超前时间较短,真正被执行的区段置信水平较高;预测超前时间较长,不被真正执行的区段置信水平较低;负备用容量约束置信水平低于正备用容量约束的置信水平,使失负荷风险小于弃风风险。具体如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_r \left(\sum_{i=1}^{N_g} P_{up,i,t} + \sum_{j=1}^{N_w} \varepsilon_{j,t}^w - \varepsilon_t^{\text{load}} \geq P_{\text{res},up,t} \right) \geq \beta_{up,t} \\ P_r \left(\sum_{i=1}^{N_g} P_{down,i,t} - \sum_{j=1}^{N_w} \varepsilon_{j,t}^w + \varepsilon_t^{\text{load}} \geq P_{\text{res},down,t} \right) \geq \beta_{down,t} \\ \beta_{up,t_1} \geq \beta_{up,t_2} \geq \beta_{up,t_3} \quad t_1 \in T_1, t_2 \in T_2, t_3 \in T_3 \\ \beta_{down,t_1} \geq \beta_{down,t_2} \geq \beta_{down,t_3} \quad t_1 \in T_1, t_2 \in T_2, t_3 \in T_3 \\ \beta_{up,t} \geq \beta_{down,t} \end{cases} \quad (1)$$

其中, N_g 、 N_w 分别为常规机组和风电场数; $P_r(\cdot)$ 为随机事件发生的概率; $P_{up,i,t}$ 、 $P_{down,i,t}$ 分别为机组*i*在*t*时刻所能提供的上调、下调备用容量; $\varepsilon_{j,t}^w$ 和 $\varepsilon_t^{\text{load}}$ 分别为风电场*j*在*t*时刻功率的预测误差以及负荷预测误差; $P_{\text{res},up,t}$ 、 $P_{\text{res},down,t}$ 分别为*t*时刻系统正、负旋转调备用容量需求; $\beta_{up,t}$ 、 $\beta_{down,t}$ 分别为给定的*t*时刻满足正、负备用要求的置信水平; T_1 、 T_2 和 T_3 为不同预测超前时间的3个调度时间段。

2 考虑预测误差的功率平衡方程

为保持电力系统安全稳定运行,需要系统内发电功率时刻等于负荷功率。为此,调度模型中有功率平衡约束,要求所有发电机组总出力时刻与负荷相等。由于制定调度计划时风电和负荷实际功率未知,只能用预测值参与运算。受尾流效应、地形、天气以及其他未知因素影响,风电预测存在较大的误

差。同时,受用户习惯、温度、天气等共同因素的影响,负荷预测也不可避免地存在误差。在电力系统调度模型中,通常用确定的预测值与不确定性的预测误差之和表示实际风电和负荷功率。在观测到实际风电和负荷功率之前,预测误差始终是不确定变量。

考虑风电和负荷的预测误差,严格的功率平衡方程为:

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_w} (P_{j,t}^w + \varepsilon_{j,t}^w - \Delta P_{j,t}^w) = P_t^{\text{load}} + \varepsilon_t^{\text{load}} - \Delta P_t^{\text{load}} + P_t^{\text{loss}} \quad (2)$$

其中, $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时刻的发电功率; $P_{j,t}^w$ 为风电场 j 在 t 时刻的预测功率; $\Delta P_{j,t}^w$ 为制定调度计划时风电场 j 在 t 时刻的弃风功率; P_t^{load} 为 t 时刻系统负荷预测功率; ΔP_t^{load} 为制定调度计划时 t 时刻可能的失负荷功率; P_t^{loss} 为 t 时刻系统网损。

功率平衡方程中由于含有不确定变量,不能直接求解。为了得到确定的调度方案,现有电力系统滚动调度模型^[4-10]的功率平衡方程直接忽略预测误差,仅由预测值参与运算,将功率平衡方程简化为式(3);文献[12]从减少失负荷概率的角度出发,将功率平衡方程等式约束转化为机组发电功率大于等于系统负荷功率的机会约束条件,即式(4)。

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_w} (P_{j,t}^w - \Delta P_{j,t}^w) = P_t^{\text{load}} - \Delta P_t^{\text{load}} + P_t^{\text{loss}} \quad (3)$$

$$P_t \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_w} (P_{j,t}^w + \varepsilon_{j,t}^w - \Delta P_{j,t}^w) \geq P_t^{\text{load}} + \varepsilon_t^{\text{load}} - \Delta P_t^{\text{load}} + P_t^{\text{loss}} \right\} \geq \alpha \quad (4)$$

其中, α 为机会约束条件成立的置信水平。

以上3种功率平衡约束中,式(2)考虑了误差的影响因而最精确,但其因不能得到数值解而不能直接用于调度模型;式(3)最简单,应用也最普遍,但其忽略了风电不确定性对电力系统功率平衡的影响;式(4)有一定意义,但其以牺牲风电消纳为代价,片面强调供电的可靠性。随着可再生能源占比的提高,电力系统电力平衡的概念也将由目前的确定性平衡转向概率性平衡,式(3)忽略预测误差的做法对电力系统安全经济运行的影响也将越来越大。

因此,本文在电力系统功率平衡方程中不再忽略预测误差,也不在供电可靠性和风电消纳中二选一,而是从寻求式(2)处理方法的角度出发,求解含有预测误差不确定变量的功率平衡方程,进而得到确定性调度方案。

为求解式(2)所示既含有不确定变量又含有确定性变量的功率平衡方程,本文首先将式(2)松弛为一个不等式约束,以此构造一个不确定环境下的集,

如式(5)所示。

$$\left| \sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_w} (P_{j,t}^w + \varepsilon_{j,t}^w - \Delta P_{j,t}^w) - (P_t^{\text{load}} + \varepsilon_t^{\text{load}} - \Delta P_t^{\text{load}} + P_t^{\text{loss}}) \right| \leq \sigma_t \quad (5)$$

其中, σ_t 为一个较小的常数,其大小表征不确定环境下可行集的大小。当 $\sigma_t = 0$ 时,式(5)则退化为式(2)。在式(5)的定义下,功率平衡转变为在不确定环境下最大化随机事件成立的概率问题,如式(6)所示。

$$\max P_t \left\{ \left| \sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_w} (P_{j,t}^w + \varepsilon_{j,t}^w - \Delta P_{j,t}^w) - (P_t^{\text{load}} + \varepsilon_t^{\text{load}} - \Delta P_t^{\text{load}} + P_t^{\text{loss}}) \right| \leq \sigma_t \right\} \quad (6)$$

以所有机组的出力满足式(5)作为一个事件,则功率平衡问题就是一个在预测误差导致的不确定环境下极大化随机事件(式(5))发生概率的问题,这是相关机会规划问题^[18]。相关机会规划的核心思想是在不确定环境下通过极大化随机事件成立的机会,从而给出最优决策。

3 机会约束相关机会目标规划模型

3.1 相关机会规划

相关机会规划是使事件的机会函数在不确定环境下达到最优的一种随机优化理论。单目标相关机会规划模型如下:

$$\begin{cases} \max P_t \{h(x_i, \xi) \leq 0\} \\ \text{s.t. } g_j(x_i, \xi) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (7)$$

其中, x_i 为决策变量; ξ 为随机变量; $h(\cdot)$ 表示优化目标中的函数; $g_j(\cdot)$ 表示可能的约束,共有 p 个。

随机相关机会规划模型可以表述为在不确定环境 $g_j(x_i, \xi) \leq 0$ 下,极大化随机事件 $h(x_i, \xi) \leq 0$ 发生的概率。

3.2 目标规划

电力系统滚动调度模型中既有方案总成本和可再生能源消纳的目标函数,又有表征功率平衡的机会函数成立最大化的目标函数。对多个目标函数进行加权求和将其转化为单目标优化的方法受目标函数数量纲和数量级的影响较大,交互式地利用可行解之间的支配关系迭代更新得到 Pareto 前沿集的方法在应用于大规模系统时存在时间过长的问題。为此,本文引入目标规划来求解所建多目标相关机会规划模型。目标规划最早由 Charnes 和 Cooper 提出^[19],是由决策者事先给出每个优化目标理想值的目标向量,然后将多目标优化问题转化为向量目标

函数与目标向量之间某种范数意义下的距离最小化问题。根据各个目标函数重要性的不同,可以为每个目标函数的实现设置优先级,这样就可以按照制定的优先级结构尽可能实现更多目标。

3.3 机会约束规划

随着可再生能源比例的增大,电力系统调度方案中需要预留更多的旋转备用容量以应对可再生能源出力的不确定性。调度方案中预留的旋转备用容量越多,则越有利于可再生能源的消纳,但同时会降低方案的经济性;反之,较少的备用容量能够提高方案的经济性但不利于可再生能源的消纳。为兼顾方案的经济性和可再生能源消纳,可以在保证基本负荷备用和事故备用的基础上,以某一概率保证可再生能源出力不确定性需求。为此,本文模型备用容量约束采用机会约束条件,在保障基本负荷备用和事故备用的基础上,以某一置信水平保证风电出力不确定需求。

3.4 机会约束相关机会目标规划

将目标优化和机会约束规划引入多目标相关机会规划模型,建立机会约束相关机会目标规划模型:

$$\begin{cases} \min \sum_{j=1}^r A_j \sum_{i=1}^m (u_{ij} d_i^+ + v_{ij} d_i^-) \\ \text{s.t. } P_r \{h_i(\mathbf{x}, \xi) \leq 0\} + d_i^- - d_i^+ = s_i \quad i=1, 2, \dots, p \\ k_i(\mathbf{x}, \xi) + d_i^- - d_i^+ = s_i \quad i=p+1, p+2, \dots, m \quad (8) \\ P_r \{f_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0\} \geq \beta_j \quad j=1, 2, \dots, q \\ g_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0 \quad j=q+1, q+2, \dots, n \\ d_i^-, d_i^+ \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, m \end{cases}$$

其中, A_j 为优先因子,表示各目标函数的优先级; r 为优先级总数; m 为每个优先级内目标函数数量; u_{ij} 和 v_{ij} 分别为优先级 j 的目标 i 正偏差和负偏差的权重; d_i^- 和 d_i^+ 分别为目标 i 偏离目标值的负偏差与正偏差; s_i 为单目标优化时的最优目标函数值; $\mathbf{x}$ 为确定性变量向量; ξ 为随机变量向量; β_j 为机会约束条件 j 成立的置信度水平; $h_i(\cdot)$ 表示原多目标优化问题的相关机会优化目标; $k_i(\cdot)$ 表示原多目标优化问题的常规优化目标; $f_j(\cdot)$ 表示原优化问题中的机会约束条件; q 和 n 分别为优化模型中机会约束条件和常规约束条件的个数。

4 基于机会约束相关机会目标规划的风火协调滚动调度模型

4.1 考虑预测信息更新的滚动机制

由前述可知,风电预测误差呈现“近小远大”的特点。为此,调度模型设计 A_{III} 段 $\rightarrow B_{II}$ 段 $\rightarrow C_I$ 段的滚动更新机制,如图 3 所示。调度计划时长为 T ,每 ΔT 时长滚动制定一次调度计划,每次计划在执行前

Δt 时刻下发。根据距离调度计划制定时刻的远近将调度区间分为 3 段,由 3 种灰度在图中标识。其中 I 段是真正执行的区段,灰度最深表示距离计划制定时刻最近,风电预测精度最高,系统备用要求也最高; II 段灰度居中,表示距离计划制定时刻时间居中,风电预测精度和系统备用要求也居中; III 段灰度最浅,表示距离计划制定时刻最远,风电预测精度最低,系统备用要求也最低。以图中 D 段计划为例说明调度计划的制定过程:在 $t^D - \Delta t$ 时刻,系统利用最新未来 T 时长的风电和负荷预测出力以及当前系统运行信息,制定 $t^D - t^E$ 时间段包含 D_I 、 D_{II} 和 D_{III} 这 3 段的调度计划并下发;调度计划从 t^D 时刻开始执行,一直执行到 t^E 时刻,期间在 $t^E - \Delta t$ 时刻,系统根据最新的预测以及系统运行信息制定新一轮调度方案。由上述过程可知,调度方案中只有 I 段是真正被执行的区段,II 段和 III 段的存在是为了保证调度计划长时段的经济性,同时也为后期调度方案的制定做参考。II 段在 I 段和 III 段之间起缓冲过渡作用,在功率波动较大的情况下,为机组提供逐次修改的机会。

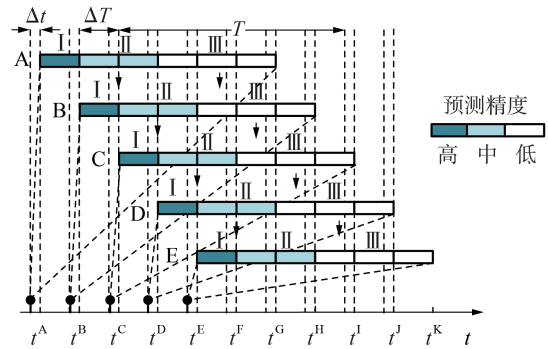


图 3 滚动调度示意图

Fig.3 Schematic diagram of rolling dispatch

4.2 目标函数

调度方案总体目标是在保障安全的前提下降低系统运行成本,提高可再生能源消纳能力,具体包括表示系统功率平衡的成本 $f_{1,t}$ 、滚动调度出力调整成本 f_2 和表示可再生能源消纳的成本 f_3 。其中滚动调度出力调整成本只计及由上一调度周期的 II 段修正为当前周期 I 段所增加的成本。以 $t^C - \Delta t$ 时刻为例,滚动调度出力调整成本为以当前时刻获得的最新预测信息为基础,由 B_{II} 段制定 C_I 段调度计划时机组出力计划调整带来的成本。

$$f_{1,t} = \max P_r \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{N_w} (P_{j,t}^w + \varepsilon_{j,t}^w - \Delta P_{j,t}^w) - (P_t^{\text{load}} + \varepsilon_t^{\text{load}} - \Delta P_t^{\text{load}} + P_t^{\text{loss}}) \right\} \leq \sigma_t \quad (9)$$

$$\begin{cases}
f_2 = \min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_g} g_{o,i}(P_{i,t}) + g_e(\Delta P_t^{\text{load}}) \right) + g_{\text{reg}}(\Delta P_{i,t}) \\
g_{o,i}(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \\
g_e(\Delta P_t^{\text{load}}) = C_{\text{load}} \Delta P_t^{\text{load}} \\
g_{\text{reg}}(\Delta P_{i,t}) = \sum_{t \in T_1} \sum_{i=1}^{N_g} \left[a_i \Delta P_{i,t}^2 + (2a_i P_{i,t}^* + b_i) \Delta P_{i,t} \right] \\
f_3 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_w} \Delta P_{j,t}^w \Delta T
\end{cases} \quad (10)$$

$$f_3 = \min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_w} \Delta P_{j,t}^w \Delta T \quad (11)$$

其中, a_i, b_i, c_i 为常规机组 i 成本采用二次模型时的系数; $g_{o,i}(P_{i,t})$ 为机组 i 的运行成本; $g_e(\Delta P_t^{\text{load}})$ 为方案不合理时切负荷风险成本; $g_{\text{reg}}(\Delta P_{i,t})$ 为方案调整成本; C_{load} 为切负荷成本电价; $P_{i,t}^*$ 和 $\Delta P_{i,t}$ 分别为常规机组 i 在 t 时刻上一调度周期制定的参考出力和本周期实际调整量。

考虑到目标函数优先级后实际目标函数如下:

$$\begin{cases}
\min A_1 \sum_{t=1}^T d_{1,t}^- + A_2 (ud_2^+ + vd_3^+) \\
f_{1,t} + d_{1,t}^- - d_{1,t}^+ = \alpha_t \\
f_2 + d_2^- - d_2^+ = f_2^* \\
f_3 + d_3^- - d_3^+ = f_3^*
\end{cases} \quad (12)$$

其中, A_1 和 A_2 分别为第一优先级和第二优先级的权重系数, $A_1 \gg A_2$; u 和 v 分别为第二优先级内目标函数 2 和目标函数 3 的权重系数, v/u 表示相对弃风惩罚成本; α_t 为以目标函数 1 为目标函数时单目标优化的最优取值; $d_{1,t}^-$ 和 $d_{1,t}^+$ 分别为目标函数 $f_{1,t}$ 距离最优目标函数值的负偏差和正偏差; f_2^* 和 f_3^* 分别为以目标函数 2 和目标函数 3 为优化目标时单目标优化的最优取值。

4.3 约束条件

约束条件总体分为确定性约束条件和机会约束条件两大类。确定性约束条件包括发电机组出力上下限约束、爬坡约束、最小启停时间约束、网络安全约束和自动发电控制 (AGC) 机组调整裕度; 机会约束条件为根据风电预测误差确定的系统运行正负备用容量约束。这样可以根据不同预测超前时间的风电预测精度灵活调节系统应对风电不确定性的备用功率, 减少为防止小概率事件发生而专门启停的机组, 提高系统运行的经济性。

(1) 常规机组约束。

常规机组运行约束有出力上下限约束、爬坡约束和最小启停时间约束。

$$\begin{cases}
P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \\
-P_{i,\text{down}} \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_{i,\text{up}} \\
(B_{i,t-1} - B_{i,t})(T_{\text{on},i,t-1} - T_{\text{on},i}) \geq 0 \\
(B_{i,t} - B_{i,t-1})(T_{\text{off},i,t-1} - T_{\text{off},i}) \geq 0
\end{cases} \quad (13)$$

其中, $P_{i,\max}$ 和 $P_{i,\min}$ 分别为机组 i 出力上、下限; $P_{i,\text{up}}$ 和 $P_{i,\text{down}}$ 分别为机组 i 调度时段间隔内最大上、下调速率; $B_{i,t}$ 表示机组 i 在 t 时刻的运行状态; $T_{\text{on},i,t-1}$ 为机组 i 到 $t-1$ 时刻的连续运行时间; $T_{\text{on},i}$ 为机组 i 一次开机最小运行时间; $T_{\text{off},i,t-1}$ 为已停运机组 i 到 $t-1$ 时刻的连续停运时间; $T_{\text{off},i}$ 为机组 i 最小停运时间。

(2) 网络安全约束。

$$-P_{l,\max}^{\text{Line}} \leq P_{l,t}^{\text{Line}} \leq P_{l,\max}^{\text{Line}} \quad (14)$$

其中, $P_{l,t}^{\text{Line}}$ 为线路 l 在 t 时刻传输的功率; $P_{l,\max}^{\text{Line}}$ 为线路 l 的最大传输功率。

(3) AGC 机组调整裕度。

为保证 AGC 机组的调整裕度, AGC 机组计划出力按式 (15) 求取^[6]。

$$k_{\min} P_{i,\max} \leq P_{i,t}^{\text{AGC}} \leq k_{\max} P_{i,\max} \quad (15)$$

其中, $P_{i,t}^{\text{AGC}}$ 为 AGC 机组 i 的计划出力; $k_{\max}$ 和 $k_{\min}$ 分别为 AGC 机组调整裕度的上、下限系数。

(4) 机组备用容量约束。

为应对风电的不确定性、负荷预测误差以及故障等意外情况发生, 保障系统的安全稳定运行, 电力系统运行中需预留一定的备用容量, 将风险限制在可控范围之内。为了在系统安全性和经济性之间达到更好的平衡, 本文系统旋转备用功率采用机会约束, 以某一置信水平保证风电出力不确定性需求。

$$\begin{cases}
P_r \left(\sum_{i=1}^{N_g} P_{\text{up},i,t} + \sum_{j=1}^{N_w} \varepsilon_{j,t}^w - \varepsilon_t^{\text{load}} \geq P_{\text{res},\text{up},t} \right) \geq \beta_{\text{up},t} \\
P_r \left(\sum_{i=1}^{N_g} P_{\text{down},i,t} - \sum_{j=1}^{N_w} \varepsilon_{j,t}^w + \varepsilon_t^{\text{load}} \geq P_{\text{res},\text{down},t} \right) \geq \beta_{\text{down},t} \\
P_{\text{up},i,t} = B_{i,t} \min \left(P_{i,\max} - P_{i,t}, \frac{T_{10}}{\Delta T} P_{i,\text{up}} \right) \\
P_{\text{down},i,t} = B_{i,t} \min \left(P_{i,t} - P_{i,\min}, \frac{T_{10}}{\Delta T} P_{i,\text{up}} \right) \\
\beta_{\text{up},t_1} \geq \beta_{\text{up},t_2} \geq \beta_{\text{up},t_3} \quad t_1 \in T_1, t_2 \in T_2, t_3 \in T_3 \\
\beta_{\text{down},t_1} \geq \beta_{\text{down},t_2} \geq \beta_{\text{down},t_3} \quad t_1 \in T_1, t_2 \in T_2, t_3 \in T_3 \\
\beta_{\text{up},t} \geq \beta_{\text{down},t}
\end{cases} \quad (16)$$

其中, T_{10} 为旋转备用的响应时间, 取值为 10 min^[20]。

实际运行中调度员可以根据系统运行需求灵活选择合适的置信水平, 在保证系统安全性的同时又兼顾经济性和可再生能源消纳。

5 算例分析

5.1 算例说明

本文采用 10 机 39 节点系统算例验证所提模型的可行性和有效性。3 座风电场分别通过节点 9、19、22 接入电力系统。每隔 4 h 对风电场和负荷未来 24 h 预测数据更新一次, 1 d 内的预测功率如附录中图 A1、A2 所示。系统 3 段正备用容量机会约束条

件置信水平分别取 97%、96%和 95%,3 段负备用容量机会约束条件置信水平分别取 97%、95%和 93%,这样将使失负荷概率低于弃风概率。计算环境为 Intel core i7-4790 3.60 GHz 8 GB 内存 DELL 台式机,采用 Cplex12.6.3 进行优化计算。

5.2 仿真结果分析

本文在风电预测误差“近小远大”的基础上,建立一种新的电力系统滚动调度模型,并采用所建机会约束相关机会目标规划模型进行求解。为验证所建滚动调度模型的有效性,采用以下 3 种滚动调度模型进行对比仿真。

模型 1:常规机会约束的电力系统日内滚动调度模型。模型采用常规基于预测值相等的功率平衡约束,系统备用采用机会约束条件,各时刻系统备用置信水平相同,均取 97%。日内滚动计划以日前计划为参考,根据风电超短期预测信息,滚动制定未来 4 h 的调度方案。

模型 2:基于相关机会规划功率平衡约束的调度模型。功率平衡方程采用本文所提先松弛为不等式约束、再转化为相关机会规划模型的处理模式。各时刻系统备用置信水平相同,均取 97%。

模型 3:本文所提考虑风电预测精度变化的滚动调度模型。功率平衡方程用本文所提先松弛为不等式约束、再转化为相关机会规划模型的处理模式。每 4 h 滚动制定未来 24 h 调度方案,在未来 $[0,4)$ h、 $[4,12)$ h 和 $[12,24)$ h 这 3 个时段中,系统正备用容量机会约束条件置信水平分别取 97%、96%和 95%,负备用容量机会约束条件置信水平分别取 97%、95%和 93%。

采用以上 3 种优化调度模型进行仿真计算,最优调度方案指标结果如表 1 所示,弃风情况如图 4 所示,火电机组出力情况如图 5 所示。系统总成本为 \$ 220 015.587,弃风电量为 16.913 MW·h,没有负荷损失。由结果可知,在 08:00 附近虽然常规机组已经尽可能降低出力,但是由于负荷较小而新能源出力较大,出现了弃风现象。

由表 1 可知,本文所提考虑风电预测精度变化的滚动调度模型发电成本最低,弃风电量最少。一方面,常规日内滚动优化调度模型是在日前计划的基础上根据日内偏差进行经济调整,由于其优化范围较小,因此全局经济性较差,而本文所提滚动优化

表 1 3 种滚动调度模型优化结果

Table 1 Optimization results of three rolling dispatch models

调度模型	总成本 / \$	弃风电量 / (MW·h)
1	221 819.958	37.800
2	220 839.113	28.833
3	220 015.587	16.913

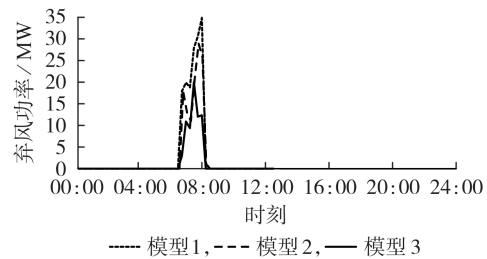


图 4 3 种滚动调度模型的弃风功率

Fig.4 Abandoned wind power of three rolling dispatch models

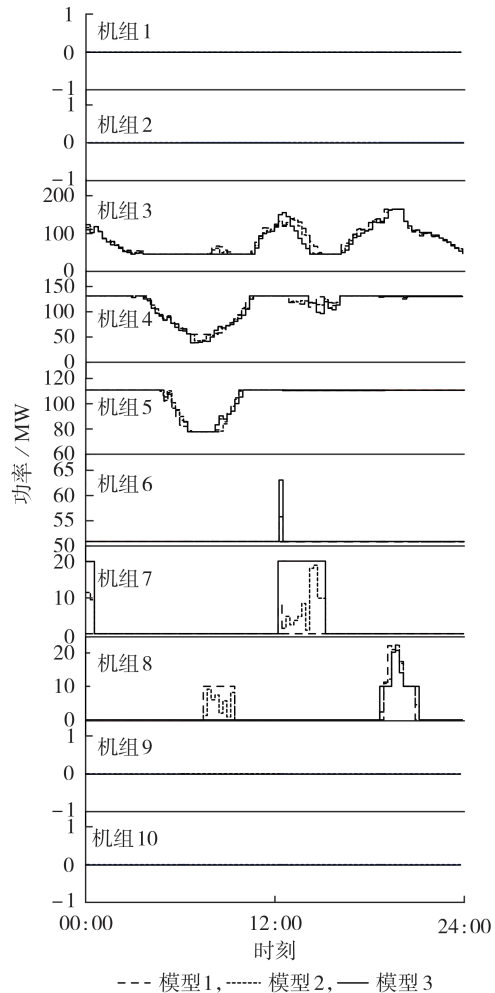


图 5 3 种滚动调度模型的火电机组功率

调度模型能够每 4 h 利用最新预测信息同时优化未来 24 h 的开机方式和机组出力,由于优化时段更长,全局经济性更好。另一方面,对比模型 1 与模型 2 的运行结果可知,与常规基于预测值相等的功率平衡方程约束相比,在功率平衡约束中考虑预测误差的影响建立调度模型制定的调度方案,由于充分考虑了风电不确定性对电能供需平衡的影响,更有利于风电的消纳。虽然约束松弛过程看似放松了对功率平衡的约束,但其实是考虑预测误差后使更多场景下的风电与负荷功率平衡,而不仅是预测误差为 0

这一个场景下的平衡。对比模型2与模型3的运行结果可知,与传统旋转备用机会约束条件相比,本文考虑风电功率预测误差“近小远大”的特点而建立的分段不同置信水平备用容量机会约束条件能够减少无效的备用容量,从而提高系统运行的经济性和风电的消纳能力。

此外,结合图3知,由于设计了 A_{III} 段 $\rightarrow B_{II}$ 段 $\rightarrow C_I$ 段的滚动更新机制,从先期优化到优化再到具体实施多层级覆盖滚动修改的过程,使制定计划更有预见性,能够根据未来较长时段的负荷和风电情况进行预先调整,因此本文所提滚动调度模型的风电消纳效果更好。

6 结论

本文根据风电预测误差“近小远大”的特点设计风火滚动优化调度模型,考虑风电出力预测误差对系统功率平衡约束和旋转备用容量的影响,建立基于机会约束相关机会目标规划的电力系统滚动调度模型。仿真结果表明,与现有电力系统日内滚动调度模型相比,本文滚动调度模型的全局经济性更好。此外,由于任意时刻的调度计划均经历了 A_{III} 段 $\rightarrow B_{II}$ 段 $\rightarrow C_I$ 段多次覆盖、逐次修改的过程,因此制定计划更有预见性,能够根据未来较长时段的负荷和风电情况进行预先调整,提高可再生能源消纳能力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 2019年上半年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. [2019-10-15]. http://www.nea.gov.cn/2019-07/25/c_138257185.htm.
- [2] HODGE B M, MILLIGAN M. Wind power forecasting error distributions over multiple timescales[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA: IEEE, 2011:1-8.
- [3] GALLESTEY E, STOTHERT A, ANTOINE M, et al. Model predictive control and the optimization of power plant load while considering lifetime consumption[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(1):186-191.
- [4] 张伯明, 吴文传, 郑太一, 等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 1-6.
ZHANG Boming, WU Wenchuan, ZHENG Taiyi, et al. Design of a multi-time scale coordinated active power dispatching system for accommodating large scale wind power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1):1-6.
- [5] 沈伟, 吴文传, 张伯明, 等. 消纳大规模风电的在线滚动调度策略与模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22):136-140.
SHEN Wei, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An on-line rolling generation dispatch method and model for accommodating large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22):136-140.
- [6] 陈建华, 吴文传, 张伯明, 等. 消纳大规模风电的热电联产机组滚动调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24):21-27.
CHEN Jianhua, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A rolling generation dispatch strategy for co-generation units accommodating large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24):21-27.
- [7] 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.
- [8] 白杨, 钟海旺, 夏清, 等. 电量协调与成本控制的日内滚动发电计划[J]. 电网技术, 2013, 37(10):2965-2972.
BAI Yang, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. An intraday rolling scheduling with unit energy coordination and operating cost control[J]. Power System Technology, 2013, 37(10):2965-2972.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] DVORKIN Y, PANDŽIĆ H, ORTEGA-VAZQUEZ M A, et al. A hybrid stochastic / interval approach to transmission-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2):621-631.
- [12] 马燕峰, 陈磊, 李鑫, 等. 基于机会约束混合整数规划的风火协调滚动调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5):127-132, 175.
MA Yanfeng, CHEN Lei, LI Xin, et al. Rolling dispatch of wind-coal coordinated system based on chance-constrained mixed integer programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5):127-132, 175.
- [13] 张凯锋, 杨国强, 陈汉一, 等. 基于数据特征提取的风电功率预测误差估计方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16):22-27, 34.
ZHANG Kaifeng, YANG Guoqiang, CHEN Hanyi, et al. An estimation method for wind power forecast errors based on numerical feature extraction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16):22-27, 34.
- [14] Bonneville Power Administration. Wind generation and total load in the BPA balancing authority[EB/OL]. [2019-10-10]. <http://transmission.bpa.gov/business/operations>.
- [15] 李志伟, 赵书强, 刘金山. 基于机会约束目标规划的风-光-水-气-火-储联合优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8):214-223.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Jinshan. Coordinated optimal dispatch of wind-photovoltaic-hydro-gas-thermal-storage system based on chance-constrained goal programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):214-223.
- [16] 殷加珏, 赵冬梅. 基于全概率风险度量的电力系统备用风险评估方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1):156-162.
YIN Jiafu, ZHAO Dongmei. Reserve risk assessment method of power system based on total probability risk measure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1):156-162.
- [17] 李志伟, 赵书强, 刘金山. 基于相关机会目标规划的电力系统优化调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10):2803-

2816.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Jinshan. Optimal scheduling of power system based on dependent-chance goal programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2803-2816.
- [18] LIU B D. Dependent-chance programming: a class of stochastic optimization[J]. Computers & Mathematics with Applications, 1997, 34(12): 89-104.
- [19] MADANSKY A, CHARNES A, COOPER W W. Management models and industrial applications of linear programming[J]. Econometrica, 1962, 30(4): 841.
- [20] 周玮,孙辉,顾宏,等. 计及风险备用约束的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 47-55, 19. ZHOU Wei, SUN Hui, GU Hong, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power systems based on risk re-

serve constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 47-55, 19.

作者简介:



李志伟

李志伟(1989—),男,河北饶阳人,讲师,博士,主要从事含可再生能源电力系统的优化调度方面的研究工作(E-mail: zhiwei_li@126.com);

赵书强(1964—),男,河北景县人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统分析与控制、电力系统规划与可靠性等方面的教学与科研工作。

(编辑 王锦秀)

Coordinated rolling dispatch of wind and thermal power considering forecasting error

LI Zhiwei¹, ZHAO Shuqiang¹, DONG Ling²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810000, China)

Abstract: In the background of large-scale wind power integrated into power system, a rolling optimal dispatch model for power system is built based on the chance-constrained dependent chance goal programming. Considering the influence of wind power forecasting error on power balance equations of dispatch model, a power balance model is established based on dependent chance programming, which transforms the power balance equality constraints into an objective function of maximizing the occurrence probability of random events. Considering the characteristics of “near small but far big” of wind power forecasting error, the confidence levels of chance-constrained conditions of system spinning reserve capacity at different moments are determined, and a rolling dispatch mode of section $A_{III} \rightarrow B_{II} \rightarrow C_I$ is designed with multiple coverage and successive modification. In order to solve the model fast, the goal programming is introduced to transform the multi-objective optimization model into a single-objective optimization model. The case simulation verifies the effectiveness of the proposed model. The proposed model can adjust in advance according to the wind power and load condition of a long period in the future, which improves the consumption ability of renewable energy.

Key words: electric power systems; rolling dispatch; chance-constrained programming; dependent chance programming; wind power

附录：

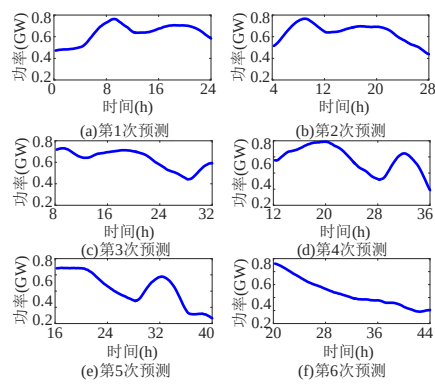


图 A1 风电预测功率
Fig.A1 Forecast wind power

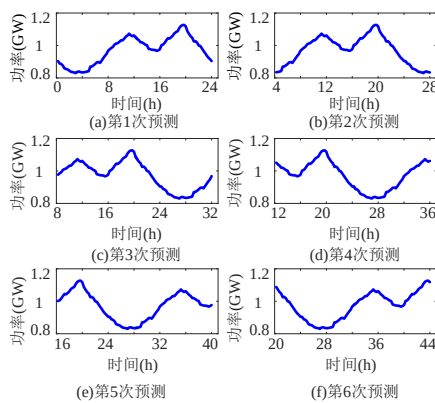


图 A2 负荷预测功率
Fig.A2 Forecast load power