

风电运行风险与备用协调优化的调度方法

李茜, 刘天琪, 莫思特, 何川, 李兴源

(四川大学电气信息学院 成都 610065)

【摘要】风电功率的预测误差体现了风电的随机性, 风电的波动性描述了风电出力在指定时空尺度上的逐点变化特性。针对风电功率预测误差和风电功率波动所需的备用容量, 通过对风电的随机性、波动性分析应对, 建立风电备用需求新模型。根据风电备用需求与系统运行备用之间的关联关系, 定义了风电运行风险, 并在此基础上构建了风电运行风险与备用协调优化的调度模型, 在模型中采用惩罚的方式对因系统为风电提供的运行备用不足所造成的失负荷成本和风能浪费成本加以考虑。通过修订后的IEEE 6节点和118节点系统算例的仿真计算, 验证了模型的正确性和有效性, 为更大限度、更经济、更安全的利用风电功率提供了一种决策支持。

关键词 协调优化调度; 运行备用; 风电运行风险; 风电

中图分类号 TM732

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.03.015

Coordinated and Optimal Dispatching Method Based on the Operation Risk of Wind Power and Reserve

LI Qian, LIU Tian-qi, MO Si-te, HE Chuan, and LI Xing-yuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University Chengdu 610065)

Abstract The prediction error of wind power reflects its random characteristic and the fluctuation of wind power describes its step-by-step changing characteristic at a specific time and space scale. In order to determine the reserve capacity needed by the prediction error and the fluctuation of wind power, a novel reserve capacity demand model is proposed through analyzing the randomness and the fluctuation of wind power. By considering the relationship between reserve capacity demand and system operation reserve, the wind power operation risk is defined, and then a dispatch model of wind power operation risk and reserve capacity coordination and optimization is proposed. In this model, the costs of load shedding and wind energy waste due to wind power operation reserve insufficiency are taken into consideration via a penalty function. Case studies based on modified IEEE 6-bus and IEEE 118-bus system show the validity and effectiveness of the proposed model. The proposed model provides a dispatch method which utilizes the wind energy with a more economic and safer way while having higher penetration.

Key words coordinated optimal dispatch; operating reserve; operating risk of wind power; wind power

与传统电源相比, 风力发电具有随机性、波动性、可调控性差以及预测精度低等特点, 因而大规模风电并网极大地增加了系统有功平衡的难度, 如何确定合理的备用容量是电网调度中的重要课题^[1-7]。然而系统备用容量配置的大小与并网风电运行安全性关系密切, 当系统运行备用不足, 并网风电存在一定的运行风险。因此, 在市场条件下, 如何针对风电出力的随机波动配置合适的备用, 如何在调度决策中权衡并网风电运行风险与运行备用效益是亟需解决的问题。

文献[1-2]在调度模型中计及了风电预测误差, 并将备用容量的购买成本计入目标函数, 实现了备

用容量在各机组间的分时段优化分配。文献[3-4]在确定系统最优旋转备用容量时, 计及了发电机组故障停运、负荷和风电出力预测偏差等不确定性因素。文献[5]推导出系统运行备用与期望失负荷比例之间的量化关系, 并将该量化关系作为发电调度的约束, 建立含大规模风电的电力系统发电和备用协调调度模型。文献[6]基于博弈论定价机制, 建立了省级系统之间的旋转备用交易模型, 该模型考虑了风电不确定性对旋转备用的影响。上述研究为含风电系统的运行备用容量配置提供了方法, 但并没有明确系统运行备用容量配置大小对并网风电的影响。同时, 上述研究在分析风电不确定性对系统运行影响时,

收稿日期: 2016-03-15; 修回日期: 2016-06-06

基金项目: 国家973项目(2013CB228200)

作者简介: 李茜(1988-), 女, 博士生, 主要从事电力系统稳定与控制、新能源并网方面的研究。

只通过风电出力预测误差分析了风电的备用需求,并没有考虑风电功率波动对系统运行的影响。

本文首先根据风电功率预测误差及风电功率波动对系统运行的影响,分析了风电功率预测误差与风电功率波动引起的备用需求。然后根据风电功率预测误差与风电功率波动的特性,建立了风电功率预测误差的时段概率分布模型和风电功率波动的功率状态概率分布模型,并根据分布模型建立风电备用需求与风电出力之间的关系,提出风电备用需求新模型。若系统为并网风电提供的运行备用不能满足其需求,并网风电将存在运行风险。因此,根据风电备用需求与系统运行备用之间的关联关系,定义并网风电运行风险,并将风险惩罚成本纳入优化目标中,建立风电运行风险与备用协调优化的调度模型,以此来权衡并网风电运行风险与系统运行备用效益。

1 风电的备用需求模型

1.1 风电出力特性对备用需求的影响

风电随机性指随时间发展风电出力数值上的不确定性、弱规律性,可细分为由风的湍流性质引起的随机性及因对风电规律认识不足而无法精确预测的随机性^[7]。前者对电网的影响有限,可不考虑,后者则主要表现为预测误差,对风电并网运行至关重要,电力系统一般采用备用容量作为应对风电功率预测误差的资源^[8]。风电出力波动描述了风电功率在指定时空尺度上邻近时段的变化特性,对于大规模风电场集群,体现为该时间尺度下较大的功率持续攀升和下降。风电功率波动增加了系统备用容量需求,为保证系统运行安全性,需为其配置相应的备用容量^[4]。

1.2 风电功率预测误差对运行备用的需求

我国主要能源消费区都处在季风区,季风是一种大范围盛行、风向有明显季节变化的风系^[9]。文献[10]指出风电出力在不同季节具有较大的差异,文献[11]基于风速的季节特性和日特性,通过大量历史数据得出一个季度内每天相同时刻具有相同的概率分布特性的结论。本文根据我国的风电特性,借鉴文献[11]的思路,认为一个季度内,每天相同时段,风电功率预测误差具有相同的概率分布。基于此,根据风电场历史数据,以绝对误差与风电装机的比值来表示风电功率预测误差,就可得到其不同季节的风电功率预测误差的时段概率分布模型。通过对时段概率分布模型选择合适的置信度可得到其置信

区间,再基于风电功率日前预测曲线,就可得到满足某置信度的并网风电功率预测区间,可表示为:

$$\begin{cases} S_{f,t} = [P_{w,d,t}, P_{w,u,t}] \\ P_{w,u,t} = \min((P_{w,f,t} + e_{w,u,t}), P_N) \\ P_{w,d,t} = \max((P_{w,f,t} - e_{w,d,t}), 0) \\ e_{w,u,t} = c_{\text{pos},t,\eta} P_N \\ e_{w,d,t} = -c_{\text{neg},t,\eta} P_N \end{cases} \quad (1)$$

式中, $S_{f,t}$ 为 t 时段并网风电功率的概率预测区间,为满足调度模型要求,将预测时段长度取为调度时段长度,即 60 min; $P_{w,u,t}$ 、 $P_{w,d,t}$ 分别为风电功率概率预测区间的上、下限值; $P_{w,f,t}$ 为风电功率日前预测值; $e_{w,u,t}$ 、 $e_{w,d,t}$ 为由预测误差概率置信区间上下限得到的风电功率向上、向下预测误差; $c_{\text{pos},t,\eta}$ 、 $c_{\text{neg},t,\eta}$ 分别为 t 时段风电功率预测误差概率分布满足某置信度 η 的置信区间取值上、下限。

根据 t 时段并网风电功率预测区间,确定系统在 t 时段需要为预测误差额外配置的上调、下调运行备用容量,有:

$$\begin{cases} R_{f,u,t} = e_{w,d,t}^* \\ R_{f,d,t} = e_{w,u,t}^* \\ e_{w,u,t}^* = P_{w,u,t} - P_{w,f,t} \\ e_{w,d,t}^* = P_{w,f,t} - P_{w,d,t} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $R_{f,u,t}$ 、 $R_{f,d,t}$ 分别表示系统在 t 时段为应对风电功率预测误差需求的上调、下调运行备用容量; $e_{w,u,t}^*$ 、 $e_{w,d,t}^*$ 分别表示根据风电功率预测区间确定的系统在 t 时段需要考虑的风电功率向上、向下预测误差值。

1.3 风电功率波动对运行备用的需求

风电场出力波动与其出力水平关系密切,不同的出力水平下风电场的出力波动情况也不同^[12]。以风电出力变化来表示风电功率波动,为体现风电在调度时段内的持续攀升和下降特性,将风电功率波动的统计时长取为 15 min。对风电场风电功率波动与风电功率分布进行统计,如图1所示。

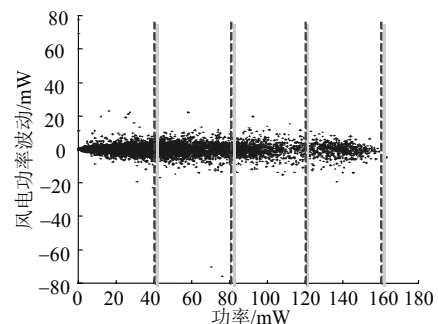


图1 风电功率波动与功率分布图

由图1可知, 当风电功率在不同出力区间时, 风电功率波动呈现不同的分布规律。因此可根据分布规律选取一个分段功率容量值 $P=40 \text{ mW}$, 分段统计风电功率波动, 建立风电功率波动的功率状态概率分布模型。对风电功率波动概率分布选择合适的置信度得到其置信区间, 此区间即为各功率状态空间对应的波动区间。

根据 t 时段并网风电功率预测区间, 确定 t 时段需要为风电功率波动额外配置的上调、下调运行备用容量。为简单起见, 本文以 t 时段风电功率预测区间的上、下限确定的向上、向下波动来表示 t 时段需要考虑的风电功率向上、向下波动量 $\Delta P_{n1,u,t}$ 、 $\Delta P_{n2,d,t}$, 同时波动不能超出容量限值 $\Delta P'_{n1,u,t}$ 、 $\Delta P'_{n2,d,t}$, 如图2所示。

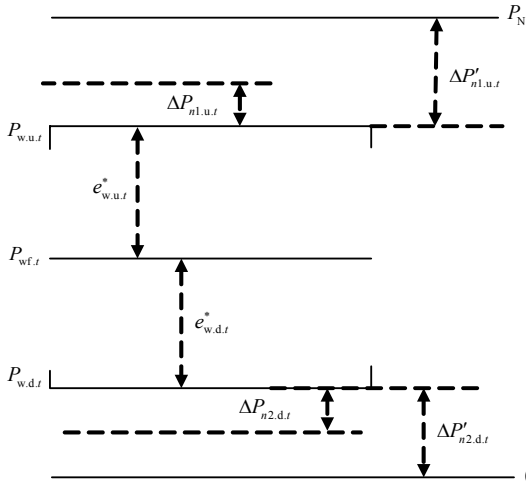


图2 风电功率波动区间

因此, t 时段为风电功率波动额外配置的上调、下调运行备用容量可表示为:

$$\begin{cases} R_{p,u,t} = \Delta P_{d,t} \\ R_{p,d,t} = \Delta P_{u,t} \\ \Delta P_{u,t} = \min(\Delta P_{n1,u,t}, \Delta P'_{n1,u,t}) \\ \Delta P_{d,t} = \min(\Delta P_{n2,d,t}, \Delta P'_{n2,d,t}) \\ \Delta P_{n1,u,t} = c_{\text{pos},n1,\eta} \\ \Delta P_{n2,d,t} = -c_{\text{neg},n2,\eta} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $R_{p,u,t}$ 、 $R_{p,d,t}$ 分别表示系统在 t 时段为应对风电功率波动需求的上调、下调运行备用容量; $\Delta P_{u,t}$ 、 $\Delta P_{d,t}$ 分别表示 t 时段需要考虑的风电功率向上、向下波动量; $\Delta P_{n1,u,t}$ 、 $\Delta P_{n2,d,t}$ 分别表示 t 时段按风电功率预测区间上限 $P_{w,u,t}$ 确定的功率状态空间 $n1$ 对应的向上波动量和预测区间下限 $P_{w,d,t}$ 确定的功率状态空间 $n2$ 对应的向下波动量; $\Delta P'_{n1,u,t}$ 、 $\Delta P'_{n2,d,t}$ 分别表示 t 时段预测区间上、下限到风电功率取值上、下限的波

动量; $c_{\text{pos},n1,\eta}$ 、 $c_{\text{neg},n2,\eta}$ 分别为功率状态空间 $n1$ 、 $n2$ 的风电功率波动满足某置信度 η 的置信区间取值上限和下限。

1.4 风电的备用需求

基于风电功率预测误差的时段概率分布和风电功率波动的功率状态概率分布, 建立并网风电备用需求模型为:

$$\begin{cases} R_{w,u,t} = R_{f,u,t} + R_{p,u,t} \\ R_{w,d,t} = R_{f,d,t} + R_{p,d,t} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $R_{w,u,t}$ 、 $R_{w,d,t}$ 分别为上调、下调运行备用容量需求。

2 协调优化调度模型

2.1 风电运行风险

对于调度时段 t 来说, 若系统为并网风电提供的运行备用容量足够, 则系统能够安全接纳由风电并网预测区间与风电功率波动区间共同决定的风电并网区间内的风电功率。若不足, 则系统存在失负荷风险或(和)风能浪费风险。

根据并网风电备用需求与系统运行备用之间的相互作用关系, 定义并网风电运行风险, 步骤如下:

1) 确定机组在当前调度时段内可以提供的运行备用容量限值^[13]为:

$$\begin{cases} r_{i,u,t}^{\text{max}} = \min(P_{i,t-1} + r_{u,i} T_{60}, P_{i,\text{max}}) - P_{i,t} \\ r_{i,d,t}^{\text{max}} = P_{i,t} - \max(P_{i,t-1} - r_{d,i} T_{60}, P_{i,\text{min}}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $r_{i,u,t}^{\text{max}}$ 、 $r_{i,d,t}^{\text{max}}$ 为机组 i 在 t 时段内可以提供的上调、下调运行备用容量限值; $P_{i,\text{max}}$ 、 $P_{i,\text{min}}$ 分别为机组 i 的出力上、下限; $r_{u,i}$ 、 $r_{d,i}$ 分别为机组 i 在的分钟级向上、向下爬坡速率; T_{60} 为机组计划出力的调度时段长度, 本文取为60 min。

2) 根据系统为风电提供的备用容量, 确定由风电引起的失负荷风险和风能浪费风险^[6]。

① 计算系统提供的运行备用容量为:

$$\begin{cases} R_{u,t} = \sum_{i=1}^{N_G} r_{i,u,t} & 0 \leq r_{i,u,t} \leq r_{i,u,t}^{\text{max}} \\ R_{d,t} = \sum_{i=1}^{N_G} r_{i,d,t} & 0 \leq r_{i,d,t} \leq r_{i,d,t}^{\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $R_{u,t}$ 、 $R_{d,t}$ 分别为系统在 t 时段内提供的上调、下调运行备用容量; N_G 为常规机组台数; $r_{i,u,t}$ 、 $r_{i,d,t}$ 分别为机组 i 在 t 时段内提供的上调、下调备用容量。

② 计算风电引起的失负荷风险。

当系统为并网风电提供的上调运行备用容量不能满足风电对上调运行备用容量需求时, 系统存在

失负荷风险,有:

$$\begin{cases} R_{u,t} > R_{l,u,t} + R_{fail,t} \\ R_{u,t} \leq R_{l,u,t} + R_{fail,t} + R_{f,u,t} + R_{p,u,t} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{lol,t} = R_{l,u,t} + R_{fail,t} + R_{f,u,t} + R_{p,u,t} - R_{u,t} \quad (8)$$

式中, $R_{l,u,t}$ 为系统负荷对上调运行备用容量的需求; $R_{fail,t}$ 为系统事故备用需求; $P_{lol,t}$ 为 t 时段由风电引起的失负荷风险。

③ 计算风电引起的风能浪费风险。

当系统为并网风电提供的下调运行备用容量不能满足风电对下调运行备用容量需求时,系统存在风能浪费风险,有:

$$R_{l,d,t} \leq R_{d,t} \leq R_{l,d,t} + R_{f,d,t} + R_{p,d,t} \quad (9)$$

$$P_{lwe,t} = R_{l,d,t} + R_{f,d,t} + R_{p,d,t} - R_{d,t} \quad (10)$$

式中, $R_{l,d,t}$ 为系统负荷对下调运行备用容量的需求; $P_{lwe,t}$ 为 t 时段由风电引起的风能浪费风险。

3) 定义并网风电运行风险。

本文将由风电引起的失负荷风险和风能浪费风险定义为风电并网运行风险, t 时段的风电并网运行风险可表示为:

$$WPR_t = P_{lol,t} + P_{lwe,t} \quad (11)$$

2.2 目标函数

1) 机组运行成本。

机组运行成本包括常规机组的运行费用和风电机组运行费用,可表示为:

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (F_{c,i,t}(P_{i,t} I_{i,t}) + SU_{i,t} + SD_{i,t}) + C_w P_{wf,t} \quad (12)$$

式中, $F_{c,i,t}(P_{i,t} I_{i,t})$ 为常规机组 i 的运行成本函数, $I_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的启停状态; $SU_{i,t}$ 、 $SD_{i,t}$ 分别为机组 i 在 t 时段的开机费用和关机费用; T 为调度时段数; C_w 为风电运行成本系数。

2) 系统运行备用成本。

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (I_{i,t} (\alpha_i r_{i,u,t} + \beta_i r_{i,d,t})) \quad (13)$$

式中, α_i 、 β_i 分别为机组 i 的上调、下调运行备用容量报价。

3) 并网风电运行风险惩罚成本。

$$F_3 = \sum_{t=1}^T (c_w^d P_{lol,t} + c_w^u P_{lwe,t}) \quad (14)$$

式中, c_w^u 、 c_w^d 分别为风能浪费风险、失负荷风险的经济惩罚系数。

协调优化调度模型的目标函数可表示为:

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (15)$$

2.3 约束条件

系统运行备用约束为:

$$\begin{cases} R_{u,t} \geq R_{l,u,t} + R_{fail,t} \\ R_{u,t} \leq R_{l,u,t} + R_{fail,t} + R_{f,u,t} + R_{p,u,t} \\ R_{l,d,t} \leq R_{d,t} \leq R_{l,d,t} + R_{f,d,t} + R_{p,d,t} \end{cases} \quad (16)$$

除上述约束条件外,还考虑了功率平衡约束、机组出力限制约束、机组最小持续开/停机时间约束以及机组最大启停次数等约束条件^[14-15]。

3 算例分析

本文的协调优化调度问题为混合整数二次规划问题,可利用Yalmip工具箱,通过MATLAB平台,调用CPLEX软件对其进行求解。

3.1 IEEE 6节点系统

并网风电场数据根据比利时2011—2013年某风电场数据等比例转换得到,该系统考虑的风电场装机容量为 $P_N=180$ mW,占系统总装机容量的30%,风电场运行成本取为12美元/mW。算例机组数据等根据文献[14]的算例参数修订得到。虽然不同季节风电功率预测误差及波动的概率分布模型因风电特性不同存在差异,但是本文对于不同季节的概率分布模型的建模方法以及在调度模型中的处理方式都是一致的,所以本文仅以春季数据进行仿真分析。为了更全面地分析并网风电对系统运行的影响,在该算例下设置了3个运行情景。

情景1:基准情景。系统网络损耗取预测负荷的5%,负荷不确定性对上调、下调运行备用容量的需求取负荷预测值的1%,并网风电对系统上调、下调运行备用的需求根据本文提出的风电备用需求模型求得,其中风电功率预测误差及风电功率波动的置信度 η 取0.8,风电功率波动的分段功率容量 P 取40 mW,事故运行备用取预测负荷的5%。风险惩罚意为体现并网风电与系统备用之间的相互作用关系,风险惩罚系数的设置涉及众多因素,本文不做详细讨论,以大于常规机组平均每MW成本来设定,风电风险惩罚系数设为 $c_w^u = c_w^d = 30$ 。

情景2:风电出力高不确定性情景。该情景在决策风电备用容量需求时,风电功率预测误差及风电功率波动的置信度 η 取0.95,其他系统参数取值同情景1。

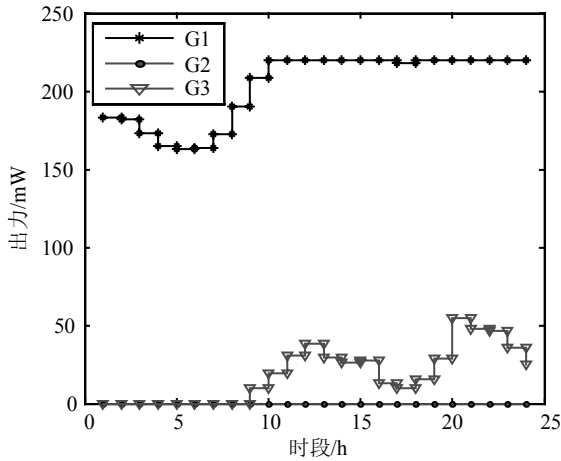
情景3:高并网风电规模情景。该情景并网风电容量提高至情景1的2倍,风电功率波动的分段功率容量 P 取80 mW,其他参数取值同情景1。

3个运行情景的运行结果如图3所示,经济运行

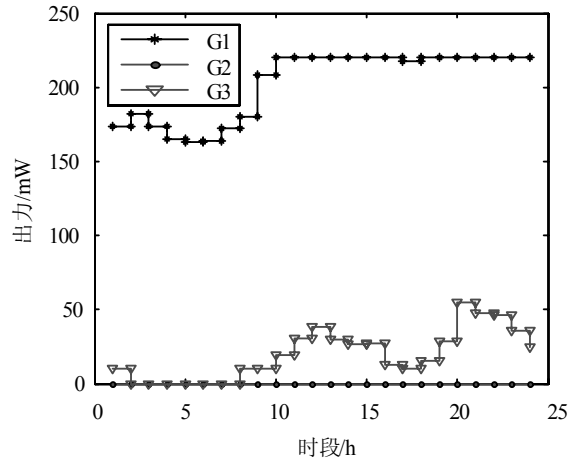
结果如表1所示。

表1 各运行场景的计算结果

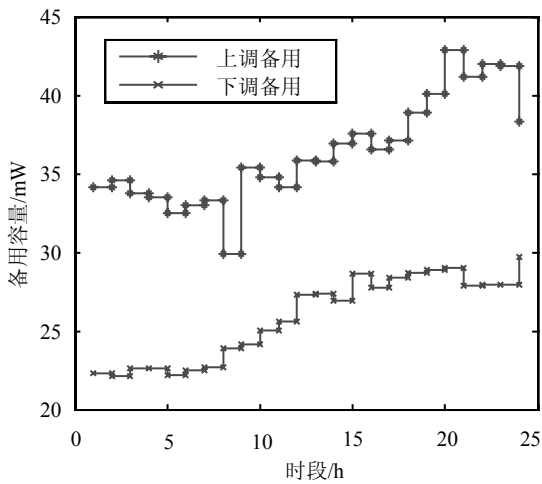
运行情景	机组运行费用/美元		运行备用费用/美元		风电运行风险惩罚费用/美元	
	常规机组	风电	上调备用	下调备用	风能浪费风险惩罚	失负荷风险惩罚
情景1	81 207.37	11 400.00	5 357.36	2 600.25	0.00	138.68
情景2	81 563.10	11 400.00	6 758.69	3 870.14	0.00	559.97
情景3	66 991.49	11 400.00	7 556.05	4 103.41	2 183.27	0.00



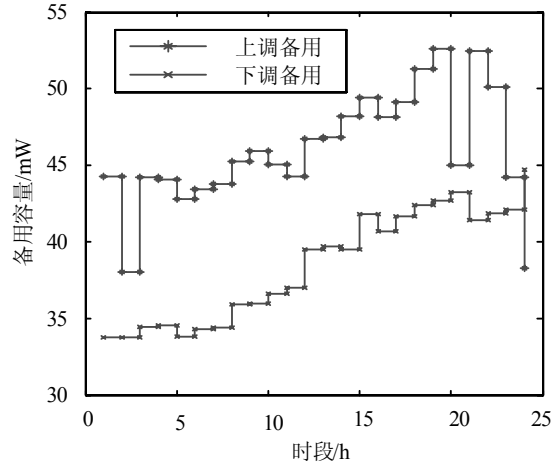
a. 情景1机组出力结果



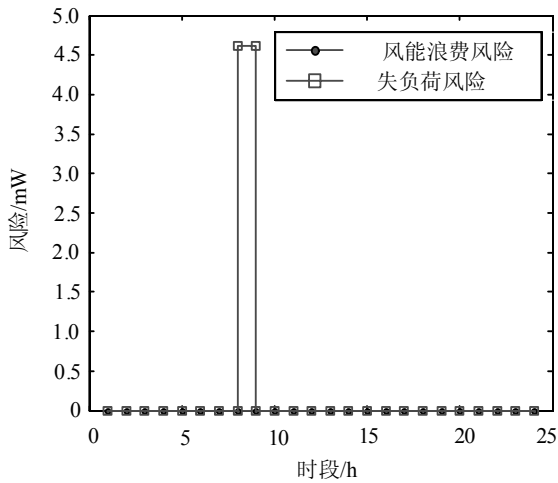
d. 情景2机组出力结果



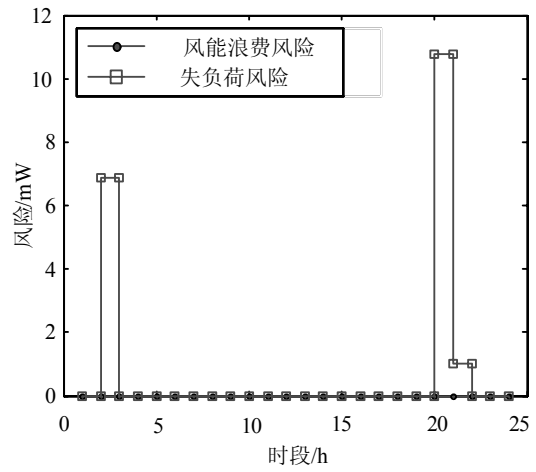
b. 情景1运行备用容量配置



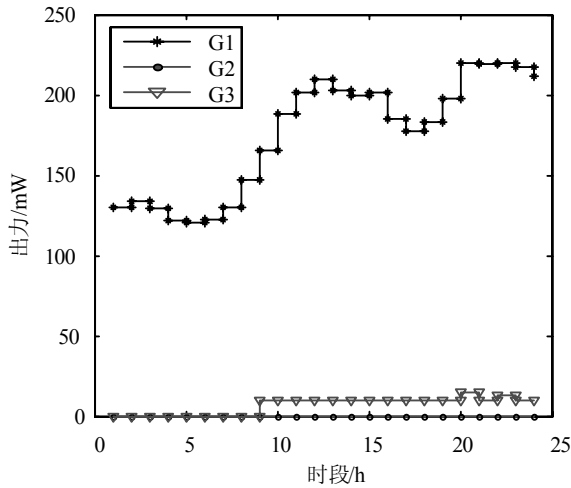
e. 情景2运行备用容量配置



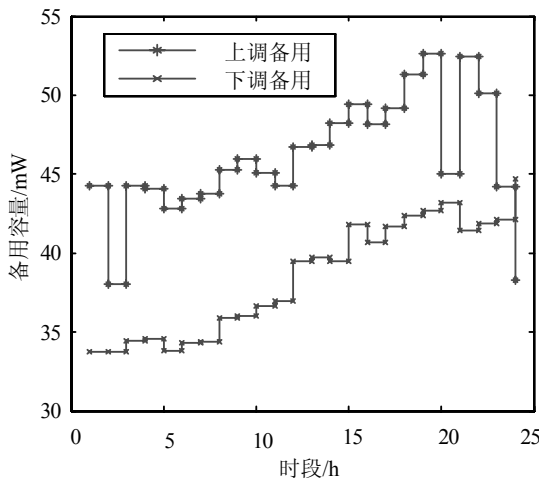
c. 情景1风电运行风险



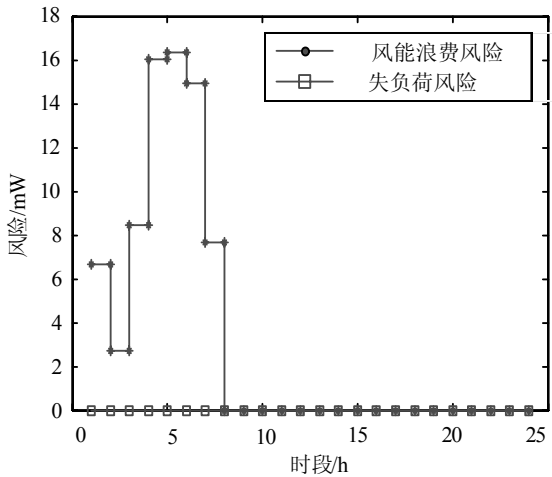
f. 情景2风电运行风险



g. 情景3机组出力结果



h. 情景3运行备用容量配置



i. 情景2风电运行风险

图3 各情景的运行结果

由情景2与情景1的运行结果可知，随着置信度取值的增大，系统需求的上调、下调用容量增大。在运行情景2下，为满足较高的备用需求，在时段1、时段8需增开机组G3，这就降低了系统运行的经济性，增加了系统机组运行费用成本。由图4、图5可知情景1在第8时段产生了失负荷风险，情景2分别第2时段、第20、第21时段产生了失负荷风险。这是因为在对应情景的这几个时段系统为风电配置的上调用容量不能满足其需求，如此时通过增开机组来满足风电的上调用容量需求，系统增加的经济运行费用远高于失负荷惩罚成本，所以在这几个时段通过牺牲风电的运行风险来满足系统运行的经济性。

由情景3与情景1的运行结果可知，随着风电并网容量的增加，系统的不确定性增大，系统需求备用容量增大，增大了系统运行备用成本。然而高容量的并网风电给系统带来了电量效益，降低了常规机组出力需求和机组运行成本费用，但是在低负荷1~8时段，因系统下调用容量不足，导致较大的风能浪费风险。

3.2 IEEE 118节点系统

为了验证本文模型和方法能适用于大规模系统，以修订的IEEE118节点系统算例进行验证。算例机组数据等根据文献[14]的算例参数修订得到。在此算例下，系统的并网风电场装机容量取3 000 mW，占系统总装机容量的30%。风电功率波动的分段功率容量 P 取为500 mW，其他参数取值同算例1的情景1。

系统为并网风电配置的运行备用容量的大小与风电运行风险惩罚系数取值有关。当风险惩罚系数取值很大，远远大于备用容量报价，为了保证系统运行经济性，系统会提供尽量多的备用容量来保证风电并网的安全性。若风电风险惩罚系数取值较小，系统会以一定的并网风电风险来换取运行经济性。因此设置了4组不同的风电风险惩罚系数来讨论其对优化结果的影响。运行结果如表2所示。

由表2可以看出，风险惩罚成本系数取值越大，并网风电风险越小。然而系统的并网风电风险越小，则意味着系统提供的运行备用容量越大，系统的运行备用容量用越大，则系统的开机方式也会越大。所以由表2也可以看出风险惩罚成本系数取值越大，机组的运行费用及运行备用费用也越大。

表2 风险惩罚成本系数对运行结果的影响

风险惩罚系数 /美元·mW ⁻¹	运行总费用 /美元	机组运行费用/美元		运行备用费用/美元		风电运行风险/mW	
		常规机组	风电	上调备用	下调备用	风能浪费	失负荷
5.00	12 029 862.37	1 440 192.66	10 473 891.00	54 437.59	40 522.55	361.66	3 802.05
10.00	12 032 245.54	1 441 580.33	10 473 891.00	74 363.81	42 003.55	40.69	0
20.00	12 032 279.72	1 441 951.40	10 473 891.00	74 585.76	41 851.56	0	0
30.00	12 032 279.72	1 441 951.40	10 473 891.00	74 585.76	41 851.56	0	0

4 结束语

1) 本文分析了风电的不确定性, 建立了风电功率预测误差的时段概率分布模型和风电功率波动的功率状态概率分布模型, 能较好地表示风电的随机性和波动性。

2) 本文针对风电的随机性、波动性分析应对风电功率预测误差和风电功率波动所需的备用容量, 建立了风电备用需求新模型。该模型考虑较为全面, 能降低风电并网引起的运行风险, 对大规模风电并网系统的备用配置具有现实指导意义。

3) 本文根据风电备用需求模型与运行备用容量间的关联关系, 定义了并网风电运行风险, 并建立了并网风电运行风险与运行备用协调优化的动态调度模型, 较好地阐明了并网风电与运行备用间的相互作用关系, 能更好地在调度决策中权衡并网风电运行风险与运行备用效益, 为解决含风电系统的优化调度问题提供了一种新方案。

参 考 文 献

- [1] 罗超, 杨军, 孙元章, 等. 考虑备用容量优化分配的含风电电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6109-6118.
LUO Chao, YANG Jun, SUN Yuan-zhang, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power system considering optimal scheduling of reserve capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6109-6118.
- [2] 李茜, 刘天琪, 李兴源. 大规模风电接入的电力系统优化调度新方法[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 733-739.
LI Qian, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan. A new optimized dispatch method for power grid connected with large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 733-739.
- [3] 殷桂梁, 张雪, 操丹丹, 等. 考虑风电和光伏发电影响的电力系统最优旋转备用容量确定[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3497-3504.
YIN Gui-liang, ZHANG Xue, CAO Dan-dan, et al. Determination of optimal spinning reserve capacity of power system considering wind and photovoltaic power affects[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3497-3504.
- [4] RAHMANN C, HEINEMANN A, TORRES R. Quantifying operating reserves with wind power: towards probabilistic-dynamic approaches[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 12(21): 1-8.
- [5] 元博, 周明, 李庚银, 等. 基于可靠性指标的含风电电力系统的发电和运行备用的协调调度模型[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 800-807.
YUAN Bo, ZHOU Ming, LI Geng-yin. A coordinated dispatching model considering generation and operating reserve for wind power integrated power system based on ELNSR[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 800-807.
- [6] XU Qian-yao, ZHANG Ning, KANG Chong-qing, et al. A game theoretical pricing mechanism for multi-area spinning reserve trading considering wind power uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1084-1095.
- [7] 李剑楠, 乔颖, 鲁宗相, 等. 多时空尺度风电统计特性评价指标体系及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 53-61.
LI Jian-nan, QIAO Ying, LU Zong-xiang, et al. An evaluation index system for wind power statistical characteristic in multiple spatial and temporal scales and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 53-61.
- [8] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1672-1678.
LI Hai-bo, LU Zong-xiang, QIAO Ying, et al. Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1672-1678.
- [9] 杨正钰, 冯勇, 熊定方, 等. 基于季风特性改进风电功率预测研究展望[J]. 智能电网, 2015, 3(1): 1-7.
YANG Zheng-yu, FENG Yong, XIONG Ding-fang, et al. Research prospects of improvement in wind power forecasting based on characteristics of monsoons[J]. Smart Grid, 2015, 3(1): 1-7.
- [10] 温步瀛, 卢鹏铭. 考虑季节差异性的不同时间尺度含风电系统旋转备用优化研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(7): 45-52.
WEN Bu-ying, LU Peng-ming. Spinning reserve optimization of power system with grid connected wind power at different time scales considering seasonal difference[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(7): 45-52.
- [11] ATWA Y M, EL-SAADANY E F, SALAMA M M A, et al. Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 360-370.
- [12] 魏琛琛, 蒋传文. 基于风电场出力波动全概率模型的风电波动经济性评估[J]. 水能源科学, 2014, 32(7): 205-208.
WEI Chen-chen, JIANG Chuan-wen. Economic impact assessment of wind power fluctuation based on probability model of wind farm output fluctuation[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(7): 205-208.
- [13] GAO Y L, PAN J Y, YANG Z J, et al. Optimization based accurate scheduling for generation and reserve of power system[J]. Sci China Tech Sci, 2012, 55: 223-232.
- [14] WU Lei, SHAHIDEHPOUR M, LI Tao. Stochastic security-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power System, 2007, 22(2): 800-811.
- [15] JIN J, ZHOU D, ZHOU P, et al. Dispatching strategies for coordinating environmental awareness and risk perception in wind power integrated system[J]. Energy, 2016, 106: 453-463.