

# 基于备用安全的含风电场的电力系统经济调度

于成龙, 孙 欣, 沈 风, 马 群

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏镇江 212013)

## Economic Dispatching in Wind Power Integrated System Based on Reserve Security

YU Chenglong, SUN Xin, SHEN Feng, MA Qun

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**摘 要:** 随着风电在电网中渗透功率的持续增加, 风电的不确定性给系统的备用决策和发电调度带来新的难题。为保障含风电场电力系统的安全运行, 本文结合风电预测误差的概率密度函数, 提出了一种系统运行安全性指标——备用安全可信度, 并以备用安全可信度最大化和火电机组运行费用最小化作为优化目标函数, 建立了含风电场的电力系统经济调度模型。针对寻优效率, 本文采用了一种将优先顺序法和内点法相结合的优化方法对机组组合问题求解。算例分析证明了所提模型和解法的可行性和合理性。

**关键词:** 风电; 经济调度; 备用安全; 机组组合

**Abstract:** With the increasing application of wind power in power systems, the uncertainty of wind power brings new challenges in both reserve capacity decision - making and generation dispatching. By considering the operation security of wind power integrated system, a kind of system operation security index, reserve security reliability, is proposed by combining with the probability density function of forecasting error for wind power. With the objective function being the maximum reserve security reliability and the minimum fuel cost, the economic dispatching model of power grid with wind power is built. In order to improve optimization efficiency, an optimized method that combines interior - point method with priority method is applied to solve the problem of unit commitment. In the end, test cases verify the feasibility and reasonability of proposed model and solution method.

**Keywords:** wind power; economic dispatch; reserve safety reliability; unit commitment

**基金项目:** 国家自然科学基金(51007032); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

## 0 引 言

近年世界环境问题和能源危机日益突出, 可再生能源的研究受到越来越多的关注。由于风能具有随机性和间歇性等特点, 这使得含风电场的电力系统运行中的不确定性因素增多, 因此, 含风电场的电力系统经济调度变成一个亟待解决的问题<sup>[1]</sup>。风电并网对系统调度的影响<sup>[2]</sup>主要体现在: 对常规机组的爬坡率和频率响应的影响; 对常规机组启停策略的影响; 对系统备用决策的影响。

针对以上风电并网的调度问题, 国内外学者从建模和求解两个方面上做了大量的研究工作<sup>[3]</sup>。文献 [4] 将风电的不确定性量化为风电成本纳入到模型中, 同时考虑风电的不足和盈余对调度策略的影响, 但没有考虑风电对系统备用决策的影响。文献 [5] 在模型中考虑了正、负旋转备用约束, 应对风电不确定性给系统调度带来的影响。文献 [6] 将风能预测误差概率分布与机组停运容量概率分布相结合, 以确定风电接入后满足系统可靠性水平的备用容量, 但是模型中依然把备用作为约束来处理。文献 [7] 对含风电场的电力系统的备用进行了优化分配, 优化中风电出力在最大可用功率的范围内可参与调度, 不能满足可再生能源全额上网的要求。目前智能算法被引入到电力系统机组组合问题中, 但是其在寻优过程中具有迭代次数多和计算速度慢等缺点, 内点法在寻优速度上相比智能算法具有一定优势。

本文深入分析含风电场电力系统经济调度的影响因素, 在相关研究成果的基础上, 提出备用安全可信度这一电力系统安全性指标, 并把它引入到模

型中进行优化,建立了综合考虑系统运行可靠性和经济性的调度模型。在求解中,针对寻优效率,本文采用优先顺序法与内点法<sup>[8]</sup>相结合的方法来确定动态机组组合的问题。

## 1 含风电场电力系统经济调度模型

### 1.1 风电预测误差的处理

风电功率预测误差的概率分布特性可以表征风电功率预测值的不确定程度。文献[9-10]的统计资料表明,风电的预测误差 $\Delta P_w$ 近似服从正态分布:

$$\Delta P_w \sim N(0, \sigma_w^2) \quad (1)$$

式中: $\sigma_w$ 是风电在预测值附近波动的标准差。

在传统的系统调度中,影响调度的不确定因素主要是负荷预测,风电并网后,影响调度的不确定因素还有风电功率的预测误差。目前负荷预测已经具有很高的准确度,因此在不考虑负荷预测误差的情况下,含风电场的系统调度考虑的主要不确定性因素就是风电出力,风电预测误差的概率密度函数如图1所示。

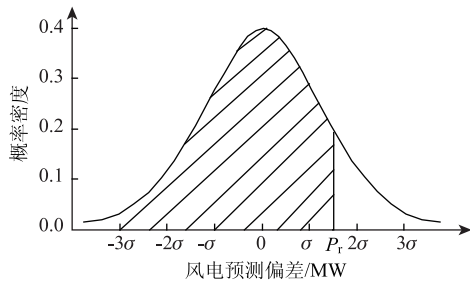


图1 风电预测误差的概率密度函数

### 1.2 备用安全可信度

备用容量是提高电力系统运行安全性的重要手段,电力系统的运行工况在实际运行中随时会发生变化,特别是在不确定性因素的影响下,如在含风电场电力系统中风电出力预测偏差,系统需要配置额外的备用容量来平抑风电的不确定性对系统负荷平衡的影响。

在传统的电力系统运行方式下,备用通常按照系统负荷的某一百分比或者运行中单机最大容量来确定。当大规模风电接入后,由于风电具有预测精度不高和调控难的特点,需要系统提供更多备用应对风电的波动,传统的确定性方法已难以满足大规模风电接入电力系统的经济可靠运行的要求。

为反映风电的不确定性对系统备用容量的影响,本文提出了一种基于系统运行安全性的指标——备用安全可信度 $\xi$ ,定义为系统提供的备用容量可以平抑风电波动对系统有功功率影响的概率,即图1中的阴影面积。备用安全可信度 $\xi$ 表示为

$$\xi = \int_{-\infty}^{P_r} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} \exp\left(-\frac{p^2}{2\sigma_w^2}\right) dp \quad (2)$$

式中: $\xi$ 为系统备用安全可信度; $P_r$ 为系统备用容量。

### 1.3 优化目标

在充分考虑含风电场电力系统运行的经济性和可靠性基础上,本文建立如下优化目标。

目标1:

$$\min f_c = \min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [u_{i,t} F_{i,t} + u_{i,t}(1 - u_{i,t-1}) S_i] \quad (3)$$

式中: $f_c$ 为常规机组运行费用; $T$ 为调度周期总时段数; $t$ 为时段号; $N$ 为总的火电机组数目; $i$ 为机组号; $u_{i,t}$ 表示机组 $i$ 在时刻 $t$ 的启停状态,1为开机,0为停机; $S_i$ 为机组 $i$ 的启停费用,这里为了简化处理,以常数处理; $F_{i,t}$ 为机组 $i$ 在时段 $t$ 的运行费用。

$$F_{i,t} = a_i (P_{i,t})^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (4)$$

式中: $P_{i,t}$ 为机组 $i$ 在时段 $t$ 的机组出力; $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 为机组 $i$ 的发电成本系数。

我国采用优先调度风电的策略,即风电出力全额并网,因此不考虑风电成本,可供优化的调度方案只是火电机组组合。

②目标2:

$$\max \xi \quad (5)$$

在含风电场的电力系统中,由于风电出力的不确定性,系统需要提供更多的备用容量来维持系统运行的可靠性。同时又考虑系统运行的经济性,需要给出系统运行的有关备用的安全边界,因此在优化目标中使备用安全可信度最大化。

### 1.4 转化成单优化目标

在求解多优化目标函数时,首先将多优化目标转化成单优化目标,转化方法主要有:线性加权法、主要目标法和极大极小点法等。为了方便对模型的求解和分析,本文采用线性加权的方法把多目标优化问题转化成单目标优化问题,但是优化目标1和优化目标2的单位不同,需要把优化目标2转化成经济优化目标,即转化成系统备用费用最大化。

通过式(2)可知备用安全可信度  $\xi$  和系统备用容量  $P_r$  是正相关的, 即系统备用容量最大时, 系统备用安全可信度最大, 系统备用费用也为最大, 系统运行的安全性越高, 系统备用费用表达式为

$$f_r = \sum_{t=1}^T C_{re} P_r \quad (6)$$

式中:  $f_r$  为系统备用容量的费用;  $C_{re}$  为系统备用成本系数。

对式(2)变形整理可得系统备用容量:

$$P_r = \sigma_w \Phi^{-1}(\xi) \quad (7)$$

式中:  $\Phi^{-1}$  为标准正态分布的反函数。

机组运行费用  $f_c$  最小化, 保证了系统运行的经济性, 备用安全可信度  $\xi$  最大化, 即需要系统提供的备用容量费用  $f_r$  最大化, 保证了系统运行的安全性, 但提高了系统运行费用, 综合考虑系统运行经济性和安全性, 将优化目标 1、2 整合成一个优化目标:

$$\min f = \alpha_1 \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [u_{i,t} F_{i,t} + u_{i,t} (1 - u_{i,t-1}) S_{i,t}] - \alpha_2 \sum_{t=1}^T C_{re} \sigma_w \Phi^{-1}(\xi) \quad (8)$$

式中:  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为机组运行费用和备用费用的权重因子, 其中  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  是系统协调安全性和经济性的权重指标, 可由调度决策人员根据系统的优化偏好确定。例如在气象条件相对稳定的春秋季节, 可适当增加经济性指标的权重; 反之, 在气象条件变化较快的夏冬季节, 则适当增加安全性指标的权重。

### 1.5 约束条件

① 功率平衡约束, 忽略网损

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} u_{i,t} + P_{w,t} = P_{D,t} \quad (9)$$

式中:  $P_{w,t}$ 、 $P_{D,t}$  分别为  $t$  时段风电出力预测值和负荷预测值。

② 火电机组出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (10)$$

式中:  $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$  分别为机组  $i$  的最小和最大出力。

③ 发电机组的爬坡约束

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq UR_i T_1 \quad (11)$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq UD_i T_1 \quad (12)$$

式中:  $T_1$  为一个调度时段(1h);  $UR_i$ 、 $UD_i$  分别为机组  $i$  的上升、下降爬坡率。

④ 火电机组开停机时间约束

$$u_{i,t} - u_{i,t-1} \leq u_{i,k} \quad (13)$$

$$k = t + 1, t + 2, \dots, \min(t + k - 1, T)$$

$$u_{i,t-1} - u_{i,t} \leq 1 - u_{i,q} \quad (14)$$

$$q = t + 1, t + 2, \dots, \min(t + q - 1, T)$$

式中:  $k$ 、 $q$  分别为火电机组  $i$  的最小开机和停机时段数。

⑤ 系统备用约束

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} P_{i,\max} \geq P_{D,t} + P_r \quad (15)$$

⑥ 备用安全可信度

$$\xi_{\min} < \xi < \xi_{\max} \quad (16)$$

式中:  $\xi_{\min}$ 、 $\xi_{\max}$  由系统调度决策人员根据当地的电源结构、电网运行可靠性等实际运行条件选取。

## 2 模型求解方法

近年来, 智能优化算法被引入到电力系统经济调度问题中, 如遗传算法<sup>[11]</sup>、粒子群算法<sup>[12]</sup>、人工神经网络<sup>[13]</sup>等, 这些智能算法不需要严格的数学模型, 寻优过程中迭代次数较多所以寻优速度慢, 并且优化的结果受初始值和寻优规则的影响。优先顺序法简单易于实现, 运算时间短且不会存在不收敛或得不到可行解等情况, 能较快获得满足应用的近似最优解; 内点法对于处理含大量等式和不等式约束的大规模非线性问题, 相比以上智能算法有计算速度快的优势。因此, 本文针对寻优效率, 采用将两者结合的方法用于求解动态机组组合问题。

### 2.1 机组排序及形成初始可行解

优先顺序法是将系统可调度的机组按某种经济特性指标排序, 根据系统负荷大小按该顺序依次投切。本文采用机组的最小比耗量  $\mu_{i,\min}$  作为经济特性指标对机组进行排序<sup>[14]</sup>, 由于每台机组的运行参数不同, 最小比耗量值也不同,  $\mu_{i,\min}$  越小其优先级越高, 在机组满足负荷平衡约束的条件下, 机组运行顺序按优先级从高到低, 而机组停机顺序则按优先级由低到高, 最终形成机组的初始可行解。

### 2.2 初始可行解的修正

考虑每台机组的最小开停机时间, 以及某时段必运行或必停机等约束, 在初始可行解的邻域内进行修正。在没有达到机组最小停机时间时机组要求启动, 在没有达到机组最小开机时间时机组要求停机, 进而对初始可行解进行修正。

### 2.3 算法的求解步骤

① 按机组的  $\mu_{i,\min}$  值从小到大进行排序。

② 根据系统负荷预测的功率差额按顺序依次上下调节机组出力，确定直到满足负荷平衡时所需启停的机组状态。

③ 按各机组最小开停机时间约束，修正机组启停状态，得到一组修正后的可行解。

④ 在某种确定的组合方式下采用内点法进行负荷优化分配。

⑤ 对目标函数的优化值进行比较，得到最优解。

### 3 算例分析

为验证本文所提模型的可行性，以6机系统为例进行计算，系统的主要参数参考文献[15]，系统由一个装机容量为130MW的风电场和5台火电机组组成，风电预测误差的标准差取25MW，系统在各单位时间内备用成本系数  $C_{re}$  取30美元/MW，火电机组具体参数如表1所示。设置内点法最大迭代次数为50次，中心参数  $\sigma$  取0.1，收敛精度为  $\epsilon=10^{-5}$ 。负荷和风电功率的预测值如图2所示。

表1 常规机组参数

机组参数	机组1	机组2	机组3	机组4	机组5
$P_{i,\max}/\text{MW}$	500	400	250	200	120
$P_{i,\min}/\text{MW}$	180	150	80	75	40
$UR_i/(\text{MW/h})$	200	150	100	90	50
$UD_i/(\text{MW/h})$	200	150	100	90	50
$S_i/\$$	500	300	450	800	620
$a_i$	0.000 48	0.001	0.002	0.002 8	0.004
$b_i$	15.5	16	16.3	17	17.4
$c_i$	1 000	900	800	750	680
$\mu_{i,\min}$	17.740	18.650	20.000	21.310	23.574

式(8)中， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为机组运行费用和备用费用的权重因子，其不同的取值表示考虑机组运行费用和备用费用的偏重点不同，优化结果也将不同。为求得在不同的备用安全可信度  $\xi$  下机组组合情况和系统各项运行费用情况，在  $(\alpha_1, \alpha_2)$  分别取  $(0.8, 0.2)$ 、 $(0.5, 0.5)$  以及  $(0.3, 0.7)$  的3种情景下，本文对比分析说明在这3种情景下系统机组组合状态和系统各项运行费用的变化情况，结果如表2~5所示。在表2时段1中，“11000”代表机组1~5的状态分别为开机、开机、关机、关机、关机。

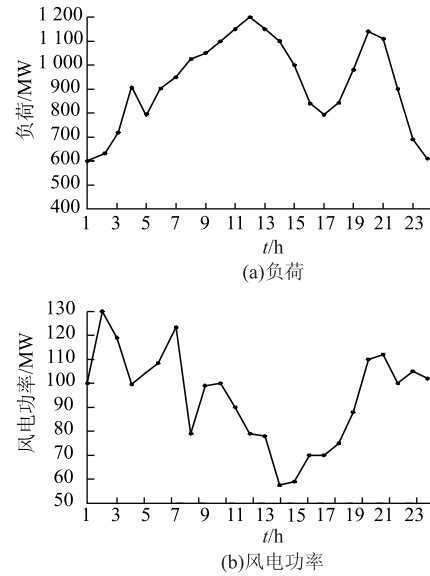


图2 负荷和风电功率的预测数据

表2 在情景1时各时段机组运行状态情况

时段	状态	时段	状态	时段	状态	时段	状态
1	11000	7	11100	13	11110	19	11110
2	11000	8	11100	14	11110	20	11110
3	11000	9	11100	15	11100	21	11110
4	11100	10	11110	16	11100	22	11100
5	11100	11	11110	17	11100	23	11000
6	11100	12	11110	18	11110	24	11000

表3 在情景2时各时段机组运行状态情况

时段	状态	时段	状态	时段	状态	时段	状态
1	11000	7	11100	13	11110	19	11110
2	11000	8	11100	14	11110	20	11110
3	11000	9	11110	15	11100	21	11110
4	11100	10	11110	16	11100	22	11100
5	11100	11	11110	17	11100	23	11000
6	11100	12	11110	18	11110	24	11000

由表2、表3和表4中机组启停情况对比可知，随着系统对备用偏重程度的提升，电力系统侧重于系统的安全运行，满足系统的安全运行需要预留更多的备用，因此调度员要根据形势改变机组原有的开停机计划。如在负荷高峰的时候，随着对备用要求的提高，在情景2的时段9和情景3的时段9、时段17中，使得启停费用比较高的机组4也处于了开机状态。

表4 在情景3时各时段机组运行状态情况

时段	状态	时段	状态	时段	状态	时段	状态
1	11000	7	11100	13	11110	19	11110
2	11000	8	11100	14	11110	20	11110
3	11000	9	11110	15	11100	21	11110
4	11100	10	11110	16	11100	22	11100
5	11100	11	11110	17	11110	23	11000
6	11100	12	11110	18	11110	24	11000

表5 3种情景下各项费用的对比 \$

$(\alpha_1, \alpha_2)$	备用安全 可信度	启停 费用	备用 费用	总费用
(0.8, 0.2)	0.872	3 090	20 520	281 365
(0.5, 0.5)	0.912	3 540	23 400	290 760
(0.3, 0.7)	0.947	3 902	29 160	306 366

从表5中数据可以看出,随着系统备用费用的权重因子的升高,系统备用安全可信度值越大。为了提高系统的可靠性,需要预留更多的备用,改变系统原有的机组启停方式,系统的备用费用和启停费用也随之升高。显然,要提高系统的可靠性水平,所需要投入的总费用越多。

## 4 总 结

含风电场的电力系统,其动态经济调度比传统经济调度复杂。针对风电的不确定性对系统运行安全性和经济性的影响,本文提出了备用安全可信度这一系统安全性指标,并建立了备用安全可信度最大化和机组运行费用最小化的多优化目标的经济调度模型。对于建立模型的求解,本文针对寻优效率提出了一种优先级排序和内点法相结合的机组组合优化方法。研究表明,系统运行安全性与本文提出的备用安全可信度有密切关系,该模型的提出对调度人员如何合理选择含风电场电力系统运行的可靠性和经济性具有参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] 陈炳森,胡华丽. 我国风电发展概况及展望 [J]. 电网技术, 2008, 32(2): 272-275.
- [2] 于晗,钟志勇,黄杰波. 考虑负荷和风电出力不确定性的输电系统机会约束规划 [J]. 电力系统自动化,

2009, 33(2): 34-40.

- [3] 周玮,孙辉. 含风电场的电力系统经济调度研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 149-152.
- [4] 任博强,彭鸣鸿,蒋传文. 计及风电成本的电力系统短期经济调度建模 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 67-72.
- [5] 周玮,彭昱,孙辉. 含风电场的电力系统动态经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 13-18.
- [6] 孟祥星,王宏. 大规模风电并网条件下的电力系统调度 [J]. 东北电力大学学报, 2009, 29(1): 1-7.
- [7] Lee T Y. Optimal spinning reserve for a Wind-thermal power systems using EIPSO [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1612-1621.
- [8] 王剑,刘天琪. 基于优先级排序和内点法的机组优化组合 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 56-59.
- [9] 谭伦农,张保会. 市场环境下的事故备用容量 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 54-58.
- [10] Miguel A, Ortega-Vazquez, Daniel S Kirschen. Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2009, 24(1): 114-124.
- [11] 石立宝,徐国禹. 遗传算法在有功安全经济调度中的应用 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(6): 42-44.
- [12] 姜文,严正. 基于一种改进粒子群算法的含风电场电力系统动态经济调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 174-183.
- [13] 文福栓,韩祯祥. 人工神经网络模型的无功电源最优分布及经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(3): 20-28.
- [14] 黎静华,兰飞. 适合于机组组合问题的扩展优先顺序法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 1-7.
- [15] 张燕. 含风电场的电力系统动态经济调度 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010, 33-35.

收稿日期: 2013-10-12

作者简介:

于成龙(1988—),男,硕士研究生,研究方向为含风电场的电力系统经济调度, E-mail: 2008longchina@163.com;  
孙欣(1980—),女,副教授,硕士生导师,研究方向为新能源发电技术等, E-mail: moisophie@mail.ujs.edu.cn.

(责任编辑: 杨秋霞)