

计及风险备用约束的风蓄联合运行动态经济调度

抽水蓄能电站具有良好的调峰填谷功能，能够缓解大规模风电并网带来的运行挑战。通过引入风速预测误差的概率分布函数描述风电的不确定性，在此基础上引入失负荷风险指标和风能浪费风险指标进行约束，建立风蓄联合运行动态经济调度模型，保证了系统的可靠性和经济性。模型中考虑了由于风电不确定性增加的常规机组正负旋转备用成本，利用改进粒子群算法对模型进行求解。算例分析表明，抽水蓄能机组能够为风电提供备用，减小系统对常规机组的备用需求，在保证系统可靠性的条件下，使得经济性最优。

李燕青 李浩闪/河北省输变电设备安全防护重点实验室（华北电力大学）



李燕青/教授

20 世纪 80 年代以来，风力发电受到广泛关注，装机容量逐年上升，成为主要的清洁能源发电方式之一。随着风电在电力系统中所占比重的增加，风电的间歇性、波动性和不确定性使得电网为了保证系统运行的安全性不得不弃风。因此，选择合理的调度措施，在提高风电利用率的同时保证系统运行的安全性具有重要意义。

由于风电出力的特殊性，如何在模型中合理反映风电的特征是解决大规模风电问题的关键。文献 [1] 采用模糊集理论的方法处理风电的不确定性。文献 [2] 采用隶属度函数的方法考虑风电的不确定性，但是隶属度函数的确定无法避免人为因素。文献 [3, 4] 采用服从 Weibul 分布的随机变量描述风电的分布概率，但是 Weibul 分布未能考虑风电的时序性，短时间内与风电实际数据误差较大。文献 [5, 6] 指出短期内的风速分布服从正态分布，在风速预测的基础上利用风-功曲线对风电功率进行预测。由于风电的不确定性不可避免地

会在调度过程中造成风电功率的盈余或者缺失，为了减小系统的风险，需要配置一定的旋转备用容量。

抽水蓄能机组起停迅速、工况转换灵活，具有削峰填谷、跟踪负荷变化等良好的功能。在大规模风电并网时，抽水蓄能机组对于提高风电利用率和电网的安全性具有重要意义。综合考虑系统安全性、经济性和风能利用率，引入风速预测误差的随机模型，将各个时段风电出力作为优化变量，建立考虑失负荷风险和风能浪费风险的风蓄联合运行电力系统经济调度模型。本文经济成本中不仅考虑常规机组的发电成本，同时考虑由于风电出力大于或小于预测出力时为满足系统风险要求所需增加的旋转备用成本。旋转备用约束中不仅考虑风电计划出力小于预测出力时需要的正旋转备用约束，同时考虑风电计划出力大于预测出力时需要的负旋转备用约束。

电力系统的风险约束

1. 风速的概率分布

文献 [7] 研究表明利用风速预测和风-功曲线所得到的风电功率预测准确性更高。本文采用文献 [5, 6] 所提的均值为 0、标准差为 σ_v 的正态分布描述风速的分布特性为

$$q(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left[-\frac{(v-\bar{v})^2}{2\sigma_v^2}\right] \quad (1)$$

式中， v 为风速； $\bar{v}$ 为风速预测值。

2. 风电功率的概率分布特性

(1) 风电输出功率模型

为了确定风电输出功率的概率分布特

关键词/Keywords

风电·
抽水蓄能电站·
动态经济调度·
风险指标约束·

性, 首先需确定风电功率与风速的关系, 在此基础上利用风速的分布特性确定风电功率的分布特性。

忽略风电场的尾流和电气损耗, 则风电场的输出功率等于所有风电机组出力总和。风电输出功率与风速的关系为

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_i \text{ 或 } v > v_o \\ a + bv^3 & v_i \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v < v_o \end{cases} \quad (2)$$

式中, v_i 为切入风速; v_r 为额定风速; v_o 为切出风速; P_r 为额定输出功率; P_w 为风机的输出功率; a 、 b 为 3 次函数的系数, a 、 b 的表达式为

$$a = \frac{P_r v_i^3}{v_i^3 - v_r^3} \quad (3)$$

$$b = \frac{P_r}{v_r^3 - v_i^3} \quad (4)$$

(2) 风电功率概率分布特性

由式 (1)、式 (2) 可知, 风电场的输出功率为混合型的随机变量, 根据随机变量函数分布的求解理论, 可以求得风电功率的概率分布特性。

风电场功率离散功率的分布特性为

$$P(P_0) = \phi\left(\frac{v_i - v}{\sigma_v}\right) + 1 - \phi\left(\frac{v_o - v}{\sigma_v}\right) \quad P_w = 0 \quad (5)$$

$$P(P_r) = \phi\left(\frac{v_o - v}{\sigma_v}\right) - \phi\left(\frac{v_r - v}{\sigma_v}\right) \quad P_w = P_r \quad (6)$$

风电功率连续部分的概率密度函数为

$$f(P_w) = \frac{1}{3\sqrt{2\pi}\sigma_v b^{1/3}} (P_w - a)^{-2/3} \exp\left\{-\frac{\left[\left(\frac{P_w - a}{b}\right)^{1/3} - v\right]^2}{2\sigma_v^2}\right\} \quad 0 < P_w < P_r \quad (7)$$

3. 考虑风电不确定性的风险指标

(1) 失负荷的风险指标

失负荷风险是指实际可利用风电功率小于风电场预测平均出力, 导致系统的正旋转备用量小于风电功率随机波动量的概率。

$$P_{\text{loss}} = P\{R^u + P_{\text{ps}}^u \leq P_w^{\text{av}} - P_{\text{WT}}\} \leq \alpha \quad (8)$$

$$P_{\text{ps}}^u \leq \min\{(E_t - E_{\min})\eta_h / \Delta t, P_{\text{max}}^G - P_{\text{ps}}\} \quad (9)$$

式中, P_{loss} 为失负荷概率; R^u 为常规机组提供的正旋转备用容量; P_{ps}^u 为抽水蓄能机组提供的正旋

转备用容量; P_w^{av} 为风电的预测平均出力; P_{WT} 为风电场实际出力; E_t 为抽水蓄能电站蓄能量; $E_{\min}$ 为抽水蓄能电站最小蓄能量; η_h 为水力发电的效率; P_{max}^G 为抽水蓄能电站的最大发电功率; P_{ps} 为抽水蓄能电站的功率, 正值表示发电, 负值表示抽水。

(2) 风能浪费的风险指标

风能浪费风险指标是指风电场实际出力高出预测平均出力导致系统负旋转备用容量小于风电随机波动量的概率。

$$P_{\text{waste}} = P\{R^d + P_{\text{ps}}^d \leq P_{\text{WT}} - P_w^{\text{av}}\} \leq \beta \quad (10)$$

$$P_{\text{ps}}^d \leq \min\{(E_{\text{max}} - E_t) / (\Delta t \eta_p), | -P_{\text{max}}^p - P_{\text{ps}} |\} \quad (11)$$

式中, P_{waste} 为风电浪费的概率; R^d 为常规机组提供的负旋转备用; P_{ps}^d 为抽水蓄能机组提供的负旋转备用容量; E_{max} 为抽水蓄能机组最大蓄能量; η_p 为水泵抽水效率; P_{max}^p 为抽水蓄能机组最大抽水功率。

考虑风险备用约束风蓄联合运行经济调度模型

1. 目标函数

以满足一定风险约束下系统经济运行为目标建立模型。将正、负旋转备用费用考虑到发电费用中, 建立考虑两种风险约束的动态经济调度模型。通过求解模型合理安排风电、抽水蓄能电站的计划出力和系统正负旋转备用容量。

目标函数为

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [C_i(P_{i,t}) + c_u R_t^u + c_d R_t^d] \quad (12)$$

式中, T 为调度小时数; N 为火电机组数量; $C_i(P_{i,t})$ 为火电机组燃料费用; R_t^u 、 R_t^d 分别为火电机组 t 时刻提供的正、负旋转备用容量; c_u 、 c_d 分别为正、负旋转备用的成本系数。

火电机组的燃料费用为

$$C_i(P_{i,t}) = a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 \quad (13)$$

式中, $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时刻的功率; a_i 、 b_i 和 c_i 为火电机组燃料成本系数。

2. 约束条件

为简化计算, 本文中假设风电场中各个机组

的出力相同,约束条件如下。

1) 有功功率平衡约束为

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + N_w P_{w,t} + P_{ps,t} = P_{L,t} \quad (14)$$

式中, N_w 为风电场中风电机组的数量; $P_{w,t}$ 为单个风电机组 t 时刻的出力; $P_{ps,t}$ 为抽水蓄能机组 t 时刻的出力; $P_{L,t}$ 为 t 时刻的负荷功率。

2) 火电机组出力约束为

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

式中, $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$ 分别为机组 i 的最小出力 and 最大出力。

3) 火电机组爬坡速率约束为

$$-r_i^d T_{60} \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq r_i^u T_{60} \quad (16)$$

式中, r_i^d 、 r_i^u 为机组的向下、向上爬坡速率; T_{60} 为运行时间, 即 60 min。

4) 风电场出力约束为

$$0 \leq N_w P_{w,t} \leq N_w P_r \quad (17)$$

5) 抽水蓄能机组抽水功率约束为

$$-P_{\max}^p \leq P_{p,t} \leq 0 \quad (18)$$

式中, $P_{p,t}$ 为抽水蓄能机组 t 时刻的抽水功率, $P_{\max}^p$ 为抽水蓄能机组最大抽水功率。

6) 抽水蓄能机组蓄能量约束为

$$E_{t+1} = E_t + \Delta t \left[\eta_p |P_{p,t}| - \frac{P_{G,t}}{\eta_h} \right] \quad (19)$$

$$E_{\min} \leq E_t \leq E_{\max} \quad (20)$$

式中, $E_{\min}$ 、 $E_{\max}$ 分别为机组最小、最大蓄能量。

7) 抽水蓄能机组发电功率约束为

$$0 \leq P_{G,t} \leq \min \left(P_{\max}^G, \frac{E_t}{\Delta t \eta_h} \right) \quad (21)$$

式中, $P_{G,t}$ 为抽水蓄能机组 t 时刻的发电功率。

8) 系统可靠性约束

由于风电功率的不确定性, 若要求所有风电可能出力情况下均满足系统可靠性要求, 则对系统旋转备用需求增加, 造成系统运行成本的浪费。而某些极端情况出现的概率很小, 因此可以对系统在满足一定风险约束即可靠性约束下, 进行经济调度。为保证系统的可靠性, 失负荷风险和风能浪费风险需满足一定的要求, 不能超过风险门槛值。

$$\begin{cases} P_{\text{loss}} \leq \alpha \\ P_{\text{waste}} \leq \beta \end{cases} \quad (22)$$

火电机组提供的旋转备用满足以下条件

$$\begin{cases} R_{i,t}^u = \min (P_{i,t}^{\max} - P_{i,t}, T_{10} r_i^u) \\ P_{i,t}^{\max} = \min (P_i^{\max}, P_{i,t-1} + r_i^u T_{60}) \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} R_{i,t}^d = \min (P_{i,t} - P_{i,t}^{\min}, T_{10} r_i^d) \\ P_{i,t}^{\min} = \max (P_i^{\min}, P_{i,t-1} - r_i^d T_{60}) \end{cases} \quad (24)$$

3. 模型的求解

粒子群算法是一种基于种群的智能算法, 越来越多应用于电力系统调度问题求解中。针对粒子群算法在寻优过程中易于陷入局部最优的问题, 本文采用引入粒子浓度认知的粒子群算法对模型进行求解^[8]。借鉴人工免疫算法中抗体基于个体适应度和浓度的繁殖策略, 增加粒子的多样性, 改善粒子群算法容易陷入局部最优的缺陷。相关参数如认知浓度系数和惯性权重等的算法参考文献^[8]。

本文算法的具体步骤如下。

1) 随机初始化粒子群的位置和速度, 粒子群大小为 N , 迭代次数为 T , 导入机组和算法的相关参数。

2) 根据系统的约束条件调整粒子的位置和速度, 使满足各项约束。

3) 根据目标函数计算各个粒子的适应值, 将粒子的初始值保存为个体极值和所有粒子的最优值保存为全局极值。

4) 计算粒子群惯性权重和浓度认知系数^[8], 更新粒子的速度和位置。

5) 根据系统的约束条件调整粒子的位置和速度, 使满足各项约束。

6) 计算粒子群的适应值, 更新个体极值和全局极值。

7) 若迭代次数 $t < T$, 则 $t = t + 1$, 转至步骤

4) 开始下一次迭代。否则结束程序。

算例分析

以含有风电场和抽水蓄能电站的 10 机系统对本文所提模型和算法进行仿真计算。风电场中有 150 台额定功率为 2 MW 的风电机组。抽水蓄能机组最大发电功率 $P_{\max}^G$ 为 80 MW, 最大抽水功率

$P_{\max}^p$ ，按照 $P_{\max}^p = C_h P_{\max}^G$ (C_h 为比例系数，对于抽水蓄能电站一般取为 1.0 ~ 1.2，这里取 1.2)，水库 1 天的初始蓄能量为 0 MW · h，最大蓄能量为 500 MW · h。系统的负荷预测如图 1 所示。风电机组的参数如下：切入风速 $v_i = 4$ m/s；额定风速 $v_r = 13$ m/s；切出风速 $v_o = 20$ m/s，风速预测的方差为 8%。常规机组的参数参考文献 [1]。系统正旋转备用的成本系数为 20 美元 / (MW · h)，负旋转备用成本系数为 12 美元 / (MW · h)。粒子群算法的规模为 100，迭代次数为 2 000 次，对模型进行求解。

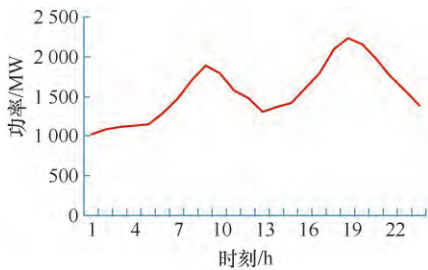


图 1 负荷预测值

按以下三种情景对模型进行优化控制和分析计算。

情景一：风险门槛值 $\alpha = \beta = 0.1$ ，有抽水蓄能机组；情景二：风险门槛值 $\alpha = \beta = 0.1$ ，无抽水蓄能机组；情景三：风险门槛值 $\beta = 0.1$ ，无抽水蓄能机组， α 在 0.02 ~ 0.1 之间。

图 2 为情景一时风电和抽水蓄能电站的出力情况，抽水蓄能电站功率正值表示发电，负值表示抽水；图 3 为情景一时常规机组提供的正、负旋转备用容量；图 4 为情景二时常规机组提供的正、负旋转备用容量。由图 3、图 4 可知，抽水蓄能机组的投入减小了系统对常规机组旋转备用的需求，从而降低系统的运行成本。由图 4 可知，当系统的正旋转备用需求较大时，负旋转备用较小；反之，正旋转备用需求较小时，负旋转备用需求则较大。这是由于系统的失负荷风险和风能浪费的风险相互矛盾所导致的。由图 2、图 4 可知，当风电出力较大时，由于风电实际出力小于预测出力可能性较大，为保证系统运行可靠性（主要为满足失负荷的风险要求），系统的正旋转备用需求较大；相反，当风电出力较小时，风电

实际出力超出预测出力可能性较大，为保证系统运行可靠性（主要为满足风能浪费风险要求），系统的负旋转备用需求较大。

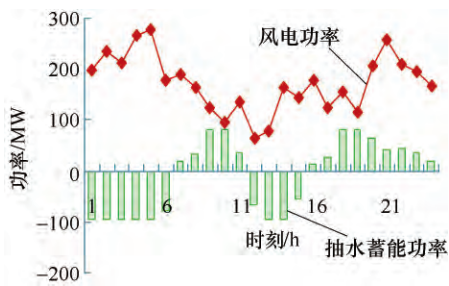


图 2 情景一时风电场出力和抽水蓄能电站出力

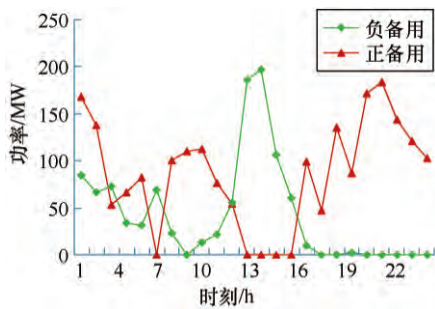


图 3 情景一时常规机组需要提供的旋转备用

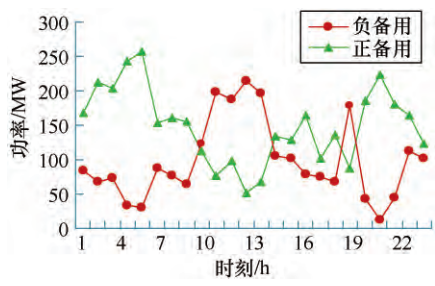
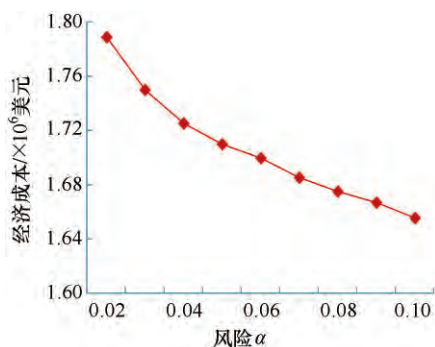
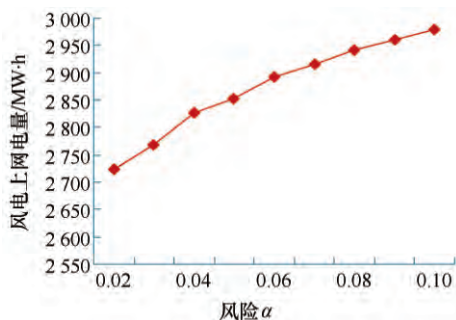


图 4 情景二时常规机组需要提供的旋转备用

图 5、图 6 分别做出了情景三时系统运行成本与风电计划出力总电量随风险门槛值 α 的变化情况。结合图 5、图 6 可以看出，当系统的风险门槛值 $\alpha = 0.1$ 时，经济成本较低，风电上网电量较高，系统可靠性低；当系统的风险值 $\alpha = 0.02$ 时，经济成本较高，风电上网电量较低，系统运行可靠性高。同理，系统的经济成本与风电上网电量随风险门槛 β 的变化情况与图 5、图 6 相似。由此可知，系统的经济性和可靠性相互矛盾，合理调整风险门槛值的大小可以对系统可靠性和经济性进行协调。

图5 情景三时系统经济成本随风险值 α 变化情况图6 情景三时风电计划出力随风险值 α 变化情况

结束语

本文在研究风电出力的概率特征基础上建立相应的概率模型,通过引入失负荷风险指标和风能浪费风险指标保证系统运行的可靠性和清洁能源的利用率,提出了考虑两种风险指标的风蓄联合运行动态经济调度新模型。模型保证了在满足一定的风险要求内,得到风电场的计划出力以及相应的正、负旋转备用需求,安排抽水蓄能机组和火电机组出力计划,确保系统的经济性最优。算例分析表明,抽水蓄能机组与风电的联合调度能够明显降低由于风电不确定性对系统常规机组的旋转备用需求,降低系统的经济成本。系统的经济成本和风电计划出力与系统的风险门槛值有

关,调度人员需要根据系统要求合理安排风险门槛值和机组的出力计划。

参考文献

- [1] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (2): 22-26.
- [2] 张学清,梁军,张利,等. 计及风光电源的一种地区电网电动汽车充电调度方法 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (2): 28-35.
- [3] Hetzer J, Yu D C. An economic dispatch model incorporating wind power [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23 (2): 603-611.
- [4] 丁明,吴义纯,张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (10): 107-110.
- [5] 吴俊,李国杰,孙元章. 基于随机规划的并网风电场最大注入功率计算 [J]. 电网技术, 2007, 31 (14): 15-19.
- [6] Matevosyan J, Soder L. Minimization of imbalance cost trading wind power on the short-term power market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (3): 1396-1404.
- [7] 杨秀媛,肖洋,陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (11): 1-5.
- [8] 王开艳,罗先觉,吴玲,等. 清洁能源优先的风-水-火电力系统联合优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (13): 27-35.
- [9] Basu M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic - II [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2008, 30 (2): 140-149.

(收稿日期: 2014-05-07) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告