节能发电调度下考虑风电功率短期预测的日前市场经济调度模型

为实现电力系统节能减排及提高系统对风电等新能源的消纳能力，可将风电功率不确定性因素考虑到电力系统日前市场经济预调度运行中。在传统机组经济调度模型基础上，充分考虑风电预测误差所引起的不平衡费用，利用机会约束的规划方法来建立含风电场在内的日前经济调度随机优化模型，并选用引力搜索算法来求解所建立的模型。最后结合IEEE—30节点网络调试系统进行模型仿真，并利用仿真结果探讨了正态分布参数、预测功率变化量和惩罚系数对日前市场内预调度成本和风电误差成本的影响，仿真结果验证了模型的有效性。

袁 泉 李 豹 吴云亮 周 鑫／中国南方电网电力调度控制中心
黄红伟 李 展 ／北京清大科越股份有限公司

袁 泉／工程师

关键词/Keywords
节能发电调度·
经济调度·
引力搜索算法·
机会约束·

0 引言

随着化石类不可再生资源的逐渐消耗殆尽，提高风电、光伏等清洁能源发电比例已成为国民经济可持续发展的必然选择。然而，风电资源大规模开发利用，虽一定程度上缓解了能源危机，但却给电力系统稳定运行和经济调度等方面带来了不利影响。虽然风电预测技术的发展在一定程度上提高了风电功率的预测准确度，但风电预测依旧无法克服准确度不高的困境，即使超短期预测时间范围内其误差仍高达7%左右。因此电网调度单位在编制日前市场预调度计划时，常将风电预测功率作为比照值，调度计划在具体执行过程中还要将风电功率预测误差量综合考虑在内。鉴于此，目前国内外很多学者作了大量相关的发电计划和调度方法的研究，文献[1]采用滚动更新的风电功率来不断对发电计划进行调整，从而尽可能减少风电功率预测误差给系统带来的影响。文献[2]综合分析Beta分布函数的曲线特性，拟合出风电功率的概率分布曲线，从而构建出含风电场的过调度和欠调度双重化调度模型来模拟实际调度环境下可能出现的情况。文献[3]利用采集的风速数据模拟风速—功率的分布曲线，从而确立了含风电的随机优化调度模型。此外，鉴于风电功率的随机特性，通常建模过程中系统各约束条件无法一一满足，因此结合文献[4]所述的机会约束规划方法来实现风电随机性约束。而日前预调度计划制订时，不能完全采用风电功率预测值来建立调度模型。

另一方面，电力系统在节能发电调度方面的目标是实现资源节约和环境保护。能够促进新能源的发展消纳和调整电力系统结构，以保证电力系统能够安全、可靠地高效运行。因此含风电的电力系统日前市场经济调度应该与节能发电调度进行有效结合。

因此，本文结合风电功率不确定性对备用容量和线路功率传输的受限因素，制订含风电场的日前市场调度计划，能够很好地实现电力系统消纳风电和节能减排。并利用引力搜索算法的寻优速度快、收敛性好的优势进行模型求

解，结合IEEE—30节点进行仿真，验证文中模型的有效性。

1 风电出力模型

为了提高风电预测的准确度，在制订日前预调度计划时，本文尽可能选取短周期的正态分布作为模拟工具。假定风速预测误差Δv服从均值为0、误差为σ的正态分布，即$\Delta v \sim N(0, \sigma^2)$。设$v_f$为风速预测值，则实际风速$v$为

$$v=v_f+\Delta v \tag{1}$$

实际风速的概率密度函数$f(v)$为

$$f(v)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\times\sigma}\times\exp(-\frac{(v-v_f)^2}{2\sigma^2}) \tag{2}$$

对应风速概率分布函数为

$$F(v)=\Phi(\frac{v-v_f}{\sigma}) \tag{3}$$

简化风电出力P_{wt}—风速v模型如下

$$P_{wt}=\begin{cases}0 & (v>v_o \text{ or } v<v_i)\\ \dfrac{P_{wn}(v-v_i)}{v_n-v_i} & (v_i<v<v_n)\\ P_{wn} & (v_n<v<v_o)\end{cases} \tag{4}$$

式中，P_{wn}为风电场额定功率，MW；v_i、v_0和v_n分别为风机的切入风速、切出风速和额定风速，m/s。

综合上述公式可推导出风电功率的概率密度函数为

$$\frac{P_{wn}}{v_n-v_i}=A$$
$$f_w(P_{wt})=\frac{1}{A}\times\frac{1}{\sqrt{2\pi}\times\sigma}\times\exp(-\frac{(\frac{P_{wt}}{A}+v_i-v_f)^2}{2\sigma^2}) \tag{5}$$

对应的风电出力分布函数为

$$F(P_{wt})=\begin{cases}0 & P_{wt}<0\\ 1-\Phi(\dfrac{v_o-v_f}{\sigma})+\Phi(\dfrac{\frac{P_{wt}}{A}+v_i-v_f}{\sigma}) & 0\leqslant P_{wt}<P_{wn}\\ 1 & P_{wt}\geqslant P_{wn}\end{cases} \tag{6}$$

2 日前调度模型

通常情况下，调度部门在制订经济调度计划过程中，是将次日负荷和风电预测结果进行综合考虑，同时兼顾发电厂报价来制订相应的发电计划，以期望达到发电成本最小。此外，无论风电场选取的预测时间多短，其功率预测误差仍然无法避免。因此在制订含风电的预调度方案时，既要充分考虑传统机组的经济调度，还要兼顾由风电预测误差所引起的不平衡费用，建立目标函数为

$$F_{\min t}=\sum_{t=1}^{T}\{\sum_{i=1}^{NG}C^i(P_i^i)+\sum_{j=1}^{NW}[C_r^j(P_{wt}^j-P_{wft}^j)+C_P^j(P_{wft}^j-P_{wt}^j)]\} \tag{7}$$

其中常规火电机组的发电成本表达式为

$$C^i(P_i)=a_iP_i^2+b_iP_i+c_i \tag{8}$$

式（7）的第二部分主要有风电功率预测误差所产生的不平衡费用，即风电预测功率可能高估或低估时产生的惩罚成本，当风电预测功率高估时需调用额外的备用容量，其所需费用为

$$C_{wr}^j(P_{wft}^j-P_{wt}^j)=\xi_r^j\int_0^{P_{wft}^j}(P_{wft}^j-P_{wt}^j)f_w(P_{wt}^j)\mathrm{d}P_{wt}^i \tag{9}$$

式中，ξ_r^j为调用备用容量的惩罚成本系数；P_{wft}^j为第j个风电场t时段的整体预测功率；P_{wt}^j为第j个风电场t时段的整体实际功率。

当风电场的预测功率低于风电场实际功率输出时，风电场可能选择“弃风”措施。因此，为了督促风电场采取相应措施来提高功率预测准确度，减小弃风量，故在优化成本模型中设置弃风的惩罚成本费用，其惩罚费用为

$$C_{wp}^j(P_{wt}^j-P_{wft}^j)=\xi_p^j\int_{P_{wft}^j}^{P_{wn}^j}(P_{wt}^j-P_{wft}^j)f_w(P_{wt}^j)\mathrm{d}P_{wt}^i \tag{10}$$

式中，ξ_p^j为“弃风”惩罚费用系数。

2.2 约束条件

探讨传统调度时，通常其约束条件并未考虑随机变量的影响。风电功率作为随机变量可能会超出约束范围，为此本文选取机会约束规划方法

来探讨风电不确定问题。

（1）常规机组出力约束

$$\max(P^i_{\min},P^i_{t-1}-R^i_{\text{down}}T)\leqslant P^i_t\leqslant\min(P^i_{\max},P^i_{t-1}+R^i_{\text{up}}T) \tag{11}$$

式中，$P^i_{\min}$、$P^i_{\max}$为常规机组i的最小、最大出力；R^i_{up}、R^i_{down}分别为常规机组i的上、下爬坡速率。

（2）系统功率平衡

$$\sum_{i=1}^{\text{NG}}P^i_t+\sum_{j=1}^{\text{NW}}P^j_{\text{wt}}=P_{\text{D}t}+P_{\text{loss}.t} \tag{12}$$

式中，$P_{\text{D}t}$为t时段的总负荷；$P_{\text{loss}.t}$为t时段的线路损耗。

（3）线路功率传输约束

$$P_r\{P^m_l>P^m_{l\max}\}\geqslant\beta \tag{13}$$

式中，P^m_{l}为第m条线路的传输功率；$P^m_{\text{l.max}}$为第m条网络线路的最大传输功率；β为该线路最大传输功率所持有的置信水平。

（4）备用容量约束

当$P^j_{\text{wf}t}\geqslant P^j_{\text{wt}}$时，则

$$P_{\text{r}}\{0\leqslant P_{\text{r}t}+\sum_{j=1}^{\text{NW}}(P^j_{\text{wf}t}-P^j_{\text{wt}})\leqslant\sum_{i=1}^{\text{NG}}(P^i_{\max}-P^i_t)\}\geqslant\beta \tag{14}$$

反之，则

$$P_{\text{r}}\{0\leqslant P_{\text{d}t}+\sum_{j=1}^{\text{NW}}(P^j_{\text{wt}}-P^j_{\text{wf}t})\leqslant\sum_{i=1}^{\text{NG}}(P^i_t-P^i_{\min})\}\geqslant\beta \tag{15}$$

式中，$P_{\text{r}t}$、$P_{\text{d}t}$分别为t时段负荷所需的上、下备用容量。

3 引力搜索算法

引力搜索算法主要是由Rashedi等学者结合万有引力定律所提炼出来的一种新型群体智能优化算法。该算法在粒子位置更新处引入自适应更新系数来提高算法搜索速度，具体如下

$$\begin{aligned}v^d_i(t+1)&=\text{ran d}v^d_i(t)+a^d_i(t)\\x^d_i(t+1)&=\lambda x^d_i(t)+v^d_i(t+1)\end{aligned} \tag{16}$$

式中，$v^d_i(t)$、$x^d_i(t)$和$a^d_i(t)$分别为t时刻粒子i的速度、位置和加速度，$d\in(1，D)$，D为搜索空间维度；λ为位置更新系数，其数值计算如下

$$\lambda=\lambda_{\max}-(\lambda_{\max}-\lambda_{\min})\times\frac{G}{G_{\max}} \tag{17}$$

式中，G、$G_{\max}$分别为当下迭代数和最大迭代数。

为制订出最优的含风电日前调度计划，首先初始化种群，然后结合随机变化量改变粒子种群，得出多种备选含风电的日前调度方案，最后综合文中所建立的优化目标模拟出最优日前各机组发电计划，其相应的流程如图1所示。

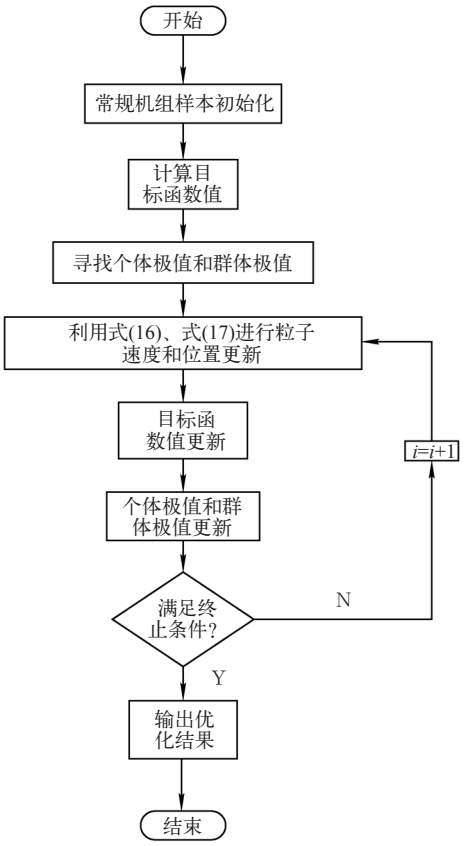

图1 引力搜索算法流程图

4 算例分析

本文选取IEEE－30网络节点测试系统，风电场接入网络节点为12号。算例选取日前市场内的预测负荷和风电预测功率值分别如图2、图3所示。测试网络各节点的分摊负荷随总预测负荷等比增加，假定λ^i_{r}=600元/MW·h，λ^i_{p}=500元/MW·h，相应参数为：P_{WN}=50 MW，v_{in}=3 m/s，v_{r}=15 m/s，v_{out}=25 m/s，备用容量选取负荷预测功率的10%，风电预测误差σ为风电预测功率值的8%。

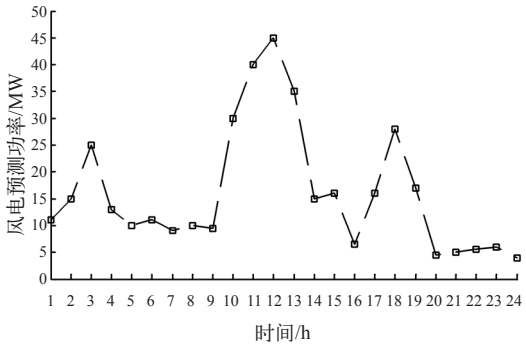

图2 风电场的预测功率

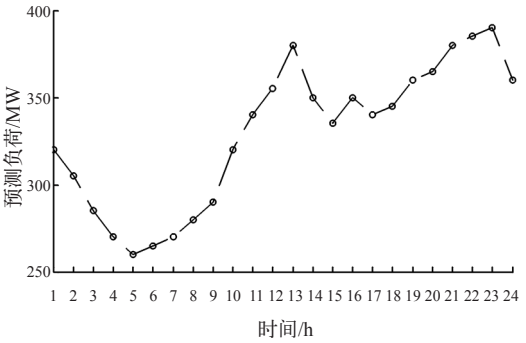

图3 负荷预测功率

结合文中所给的引力搜索算法，对目标函数进行优化仿真，并将其优化结果和遗传算法、粒子群算法的优化收敛效果进行对比，其效果如图4所示。

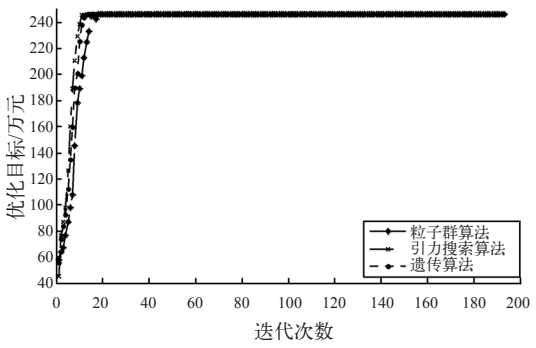

图4 几种常用算法的效果对比

由图4可以看出，利用引力搜索算法进行优化仿真的收效速度要比粒子群算法和遗传算法的收敛速度快，可提前寻到最优目标成本（246.6万元），以此证明选取的引力搜索算法在优化仿真的高效性。因此，利用引力搜索算法所得到的日前市场内并入测试网络节点的各机组预调度结果如图5所示。

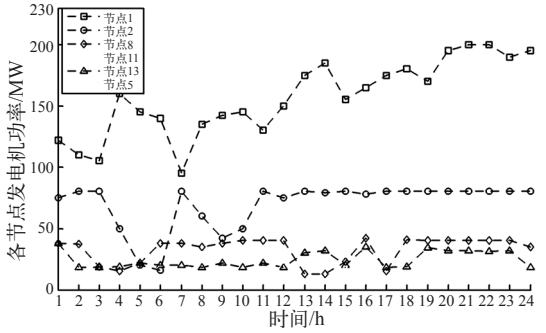

图5 置信水平β=0.95时各节点的功率

当置信水平β增加时（取值0.98），优化出的预调度总费增加，其值为258.6万元。原因在于β增大，其对应线路输送功率的约束和系统调用的备用容量限制更加苛刻，期望支付较小的预调度成本将无法满足现有的约束条件，只得上调成本。

4.1 负荷水平对系统所容纳的风电容量的影响

依照系统所能提供的备用容量为负荷预测总量的10%，探讨负荷水平和系统所接纳的风电容量对应关系如图6所示。

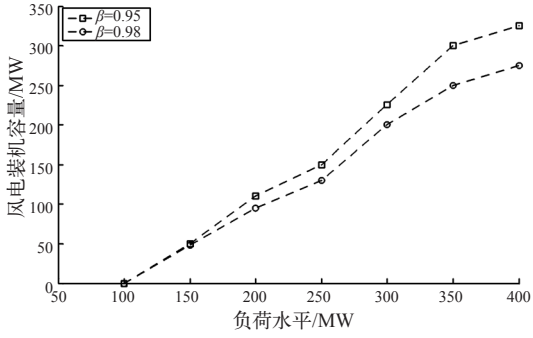

图6 负荷水平和系统所接纳的风电容量对应关系

图6反映了负荷水平处于很低数值时，此情况下不建议接纳风电并网。原因在于此状态下接纳风电会导致系统下备用容量缺乏，从而导致火电机组被迫停机，给系统运行带来风险。然而负荷水平提升，风电接纳容量也极大提升，结合式（15）看出系统下备用约束线性增加。因此，认为一定线性段范围内风电功率和负荷水平存在线性关系。而负荷水平过高，系统能提供的上备用容量约束无法满足，风电功率无法全额接纳。

4.2 风电功率预测误差对预调度惩罚成本的影响

为探讨正态分布的参数对风电误差成本的影

响程度，选取某时段的负荷预测为283.4 MW，着重讨论风电预测误差σ对误差成本的影响，如图7所示。

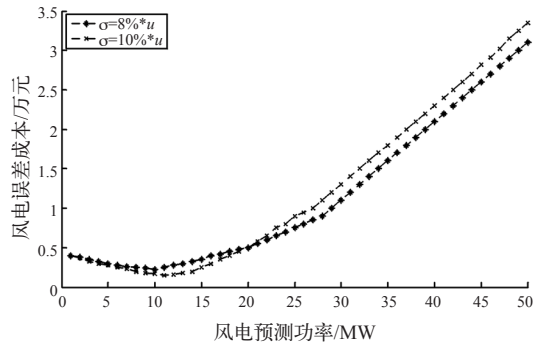

图7 风电预测偏差σ对偏差成本的影响

由图7可以看出，风电误差成本呈先降后升的趋势，下降部分相对平滑，上升部分变化较快。随着日前市场中风电预测功率上升，常规机组的功率下调，风电预测误差所带来的惩罚成本会增加。另外，风电预测误差σ增加，风电误差成本曲线在拐点前稍大，转折后减少。主要由于σ 增加，风电预测高估功率部分误差减小，从而造成风电误差成本也随之减少。

4.3 在对应风电预测功率下不同的成本系数（ξ_p^i、ξ_r^i）对日前市场的影响

不同的成本系数对目前市场的影响如图8所示。

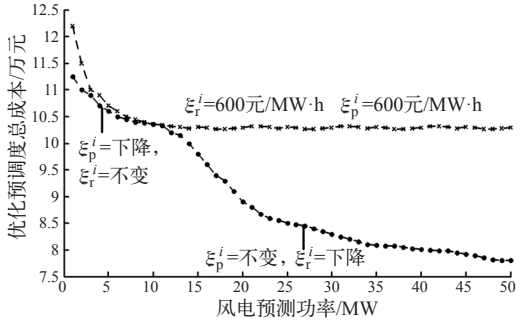

图8 不同的成本系数对日前市场的影响

由图8可以看出，日前市场内风电预测功率不断增加，风电功率被低估的情况较小，被高估的情况增大。因此，在风电预测功率很小时，风电功率被低估的数值将比被高估的数值要小。只有弃风成本系数ξ_p^i下降所引起的预调度总成本曲线下降很缓慢；风电预测功率增加，风电被高估的功率值增加，则有备用成本系数ξ_r^i降低引起的预调度总成本曲线下降趋势明显。由此可见，ξ_r^i越小，风电功率被高估的数值对风电功率不平衡原因产生的惩罚成本有利；ξ_p^i越小时，风电功率被低估的数值对成本费用也是有利的，只是相对ξ_r^i而言影响趋势没那么明显。

5 结束语

本文充分分析了风电功率随机因素对系统优化调度的影响，结合机会约束规划方法建立了日前市场的节能发电调度优化模型，结合引力搜索算法对IEEE—30节点网络测试系统进行仿真分析，结论如下。

1）负荷水平在一定程度上会影响系统接纳风电的容量，即一定线性范围内，风电被接纳的容量随负荷水平提高而增加。

2）风电误差成本随σ的变大呈先减小后增大的趋势，随风电预测功率的增加呈先降后升的趋势。

3）系统所提供的备用成本系数ξ_r^i越小，风电被高估的功率数值对功率不平衡成本有利；弃风成本ξ_p^i越小，风电功率被低估的数值对成本也是有利的，其影响效果比备用成本系数ξ_r^i对成本的影响相对偏小。

参考文献

[1] 董根源，温步瀛，江岳文．考虑发电机报价曲线的发电计划偏差的β-PSO优化方法研究[J]．电力自动化设备，2006，26(7)：18-21．

[2] 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．

[3] 吴栋梁，王扬，郭创新，等．电力市场环境下考虑风电预测误差的经济调度模型[J]．电力系统自动化，2012，36(6)：23-28．

[5] 袁铁江，晁勤，吐尔逊·伊不拉音，等．面向电力市场的含风电电力系统的环境经济调度优化[J]．电网技术，2009，33(20)：131-135．

(收稿日期：2018－04－16)EA