

基于逼近和牛顿插值法的最佳风电接纳水平确定

林小雨, 江岳文, 温步瀛

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 随着风电场规模的不断扩大, 电网接纳风电能力的限制已成为风电场规划的一个重要影响因素。为了确定系统接纳风电的最佳水平, 建立了综合考虑常规机组运行成本和风电场弃风量的调度模型。引入风电接纳水平系数, 从常规机组和风电场运行的经济性角度提出了一种基于粒子群算法的风电接纳水平的优化方法。对含1个风电场和10台常规机组的系统进行了计算分析。针对该风电场的12组典型出力数据分别优化得到对应的最佳风电接纳水平值并分别采用逼近法和牛顿插值法确定了系统的最佳接纳水平, 在该水平下的风电出力可以使系统在一个最佳经济点运行。该比例系数可以作为风电场规划的参考。

关键词: 风电接纳水平; 粒子群算法; 逼近法; 牛顿插值法; 最佳经济点

Determination of optimal wind power acceptance level based approaching and Newton interpolation

LIN Xiaoyu, JIANG Yuewen, WEN Buyang

(School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: With the enlargement of the wind farm scale, the ability of accommodating wind powers of network becomes a main factor of wind farm planning. This paper makes a scheduling model comprehensively in consideration of operation cost of conventional units and wind curtailment with a wind power acceptance level parameter to determine the optimal level of wind power acceptance. And a wind power acceptance level optimization based particle swarm algorithm is proposed in the angle of the economical operation of conventional units and wind powers. This paper calculates in a system with one wind farm and 10 conventional units and works out the optimal level of wind power acceptance respectively of the 12 groups of typical output data. And then a comprehensive optimal acceptance level is determined using approaching method and Newton interpolation. The system is in an optimal economic operation at this level and proportion coefficient can be a reference of wind power planning.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 2013J01176).

Key words: wind power acceptance level; particle swarm algorithm; approaching method; Newton interpolation; optimal economic operation

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2015)18-0012-06

0 引言

随着工业化进程的不断加快, 新能源的发展将成为一种必然的趋势。目前, 利用风能发电已经成为替代化石燃料发电的最具潜力的方式。近年来, 我国风电发展迅猛, 装机容量快速增长^[1]。由于风电具有反调峰特性和间歇性^[2], 大规模风电并网将会对电网的运行造成影响^[3], 从而限制电网接纳风电的能力而出现弃风现象。在影响电网风电接纳能

力的因素中, 最主要的因素是系统的调峰能力约束^[4]。为了评估电网接纳风电的能力, 文献[5-8]从系统调峰约束角度提出了最大调峰裕度及风电消纳能力的计算方法, 并提出了提高系统调峰能力的措施, 对各种措施进行了经济性分析。为了大规模接纳风电, 系统中的常规机组可能需要进行深度调峰, 从而增加了系统的运行成本。文献[9]以系统运行成本为目标建立了风电场弃风量计算的模型, 分析了不同的风电接入容量的风电利用率。文献[10]分别针对弃风量最小和煤耗量最小两种调度模式分别构建了相应的优化调度模型并提出了含风电电力系

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2013J01176)

统的发电调度的经济性评价指标, 对两种调度模式的利弊及适用性进行了分析。文献[11]为分析电网风电接纳能力, 分别构建了系统运行成本最小、弃风量最小和综合考虑常规机组运行成本和弃风量的三种调度模式, 从经济性角度分析了不同的调度模式下电网接纳风电的最佳水平, 在第三种调度模式能够兼顾常规机组和风电场运行经济性的特点下提出了风电出力比例, 针对一天 24 h 内的风电出力预测值优化得到某一风电场的风电接纳水平, 在该水平下电网运行的经济性是最佳的。

由以上文献分析可以看出, 系统接纳风电的水平给电力系统运行的经济性带来较大的影响。传统的调度模型中仅考虑风电出力的预测值, 这样并不能充分评估系统接纳风电的最佳水平。在考虑风电接纳水平的调度模式中也尚未针对不同风况的风电接纳水平进行综合分析。在此基础上, 本文在建立综合考虑常规机组和风电场的调度模型的基础上, 引入风电接纳水平系数, 考虑风电出力的季节性差异, 选取风电场的不同风况进行计算, 针对不同时间段内的典型风电出力值, 采用粒子群算法进行优化求解, 并分别采用逼近和牛顿插值的方法确定了系统风电接纳水平的最佳值, 为电力系统经济调度以及风电场的中长期规划与调度提供了一个较实用的模型以及量化的依据。

1 综合调度模型

1.1 考虑不同风况的调度模型

在以往的经济调度模式中, 通常仅仅考虑常规机组的经济性或风电场的弃风成本。只考虑常规机组运行成本最小的调度模式将导致比较严重的风电场弃风现象, 没有考虑到风电场的经济效益及其“节能效益”; 只考虑风电弃风成本的调度模式可能使得常规机组工作在深度调峰或频繁的启停机状态, 从而增加了常规机组的运行成本以及化石燃料损耗。

本文综合以上两种调度模式, 建立综合考虑常规机组运行成本及风电场弃风量的调度模型, 在常规机组运行成本和弃风量之间寻找一个最佳运行点。弃风量减少的同时可以减少化石燃料的损耗, 因此可以将两个目标通过一个比例系数 λ 联系起来构成一个单目标函数, 如式(1)所示。 λ 值的选取方法参照文献[11], 它的取值应该使得在优化的过程中保证常规机组运行成本与风电场弃风成本同时朝减小的趋势收敛。因此 λ 的单位可以定义为元/MW, 这样单目标函数的优化结果以“元”为单位, 本文将其称为“综合成本”。

$$\min \sum_{k=1}^f \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (I_{i,t} f(P_{k,i,t}^G)) \cdot \Delta t + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n S_{i,t} \cdot I_{i,t} \cdot (1 - I_{i,t-1}) + \lambda \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^m (\beta_w P_{k,w,t}^{\text{forecast}} - P_{k,w,t}^{\text{fact}}) \right) \quad (1)$$

式中: k 为风况序号; T 为调度的时间周期, 一般取 $T=24$ h; Δt 为调度的时间间隔, 一般一天中每一个小时分一段, 即 $\Delta t=1$ h; n 、 m 分别为参与调度的常规火电机组数和风电场数量; $I_{i,t}$ 表示一定负荷下常规机组的开停机状态, $I_{i,t}=0$ 表示机组 i 在 t 时段处于停机状态, $I_{i,t}=1$ 表示机组 i 在 t 时段处于开机状态; $P_{k,i,t}^G$ 为风况 k 下机组 i 在 t 时段的出力; $f(P_{k,i,t}^G)$ 为风况 k 下机组 i 在 t 时段的运行成本, $f(P_{k,i,t}^G) = a_i + b_i P_{k,i,t}^G + c_i (P_{k,i,t}^G)^2$, a_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 的运行成本系数; $S_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时段的开停机费用, $S_{i,t} = \delta_i + \sigma_i (1 - \exp(-T_{i,t}^{\text{OFF}}/\tau_i))$, δ_i 、 σ_i 、 τ_i 为机组 i 的启停机成本系数; $T_{i,t}^{\text{OFF}}$ 为机组 i 在 t 时段的累计停运时间; β_w 为系统对风电场 w 的风电接纳水平, 是在风电出力值基础上的一个比例系数; $P_{k,w,t}^{\text{forecast}}$ 为风况 k 下风电场 w 在 t 时段的预测出力值; $P_{k,w,t}^{\text{fact}}$ 为风况 k 下风电场 w 在 t 时段的实际出力。

约束条件

(1) 机组出力约束

$$P_i^{\text{Gmin}} < P_{k,i,t}^G < P_i^{\text{Gmax}} \quad (2)$$

(2) 机组最小启停时间约束

$$(V_{i,t}^{\text{on}} - T_i^{\text{min-on}})(I_{i,t-1} - I_{i,t}) \geq 0 \quad (3)$$

$$(V_{i,t}^{\text{off}} - T_i^{\text{min-off}})(I_{i,t} - I_{i,t-1}) \geq 0 \quad (4)$$

(3) 机组爬坡速度约束

$$-r_i^{\text{down}} \cdot \Delta t \leq P_{k,i,t}^G - P_{k,i,t-1}^G \leq r_i^{\text{up}} \cdot \Delta t \quad (5)$$

(4) 系统功率平衡约束

$$\sum_{l=1}^m P_{l,t} - \sum_{i=1}^n I_{i,t} P_{k,i,t}^G - P_{k,w,t}^{\text{fact}} = 0 \quad (6)$$

(5) 系统向上、向下旋转备用约束

$$I_{i,t} (P_i^{\text{Gmax}} - P_{k,i,t}^G) \geq P_D^{\text{up}} \quad (7)$$

$$I_{i,t} (P_{k,i,t}^G - P_i^{\text{Gmin}}) \geq P_D^{\text{down}} \quad (8)$$

(6) 风电出力约束

$$0 \leq P_{k,w,t}^{\text{fact}} \leq \min(\beta_w P_{k,w,t}^{\text{forecast}}, \Delta P_{\text{max}}) \quad (9)$$

式中: P_i^{Gmax} 、 P_i^{Gmin} 为机组最大、最小出力限值; $V_{i,t}^{\text{on}}$ 、 $V_{i,t}^{\text{off}}$ 分别为机组 i 在 t 时段的累计开机时间和累计停机时间; $T_i^{\text{min-on}}$ 、 $T_i^{\text{min-off}}$ 为机组 i 的最小开机时间和最小停机时间; P_D^{up} 、 P_D^{down} 为含风电系统所需的向上旋转备用和向下旋转备用; ΔP_{max} 为系统的最大调峰裕度。

1.2 调度模型分析

上述所建模型的综合运行成本受到风电出力的影响,换言之,它也受到风电场的装机容量的影响。在风资源充足的前提下,装机容量越大,风电场出力越大。 β_w 是在当前装机容量下的风电出力水平的一个倍数,因此,它在说明系统所能接纳的最佳的风电出力水平的同时也可以粗略评估当前装机容量的大小。通过调度模型同时对风电接纳水平 β_w 进行优化,当 β_w^{best} 优化到一个最佳接纳水平时,综合成本将达到最小,在此接纳水平上再增大或减小 β_w 都将使综合成本增大。

风电出力具有季节性差异,不同时间段内一天的风电出力差异也较大,同一天内的不同时段的风电出力也具有一定的差异。由于两年之间相同季节相同时间段内的风电出力具有一定的相似性,因此可以采用某风电场往年的风电出力数据,取风电出力典型数据来模拟不同的风况。根据式(1)的优化模型,需要对 f 组不同的风况逐一进行调度然后求和并优化得到最佳的风电接纳水平,算法过程复杂且不易收敛,因此本文首先针对风电场 w 的每一种风况 k 分别优化得到对应的风电接纳水平 $\beta_{w,k}$ ($k=1, 2, \dots, f$)的值,确定系统对该风电场的最佳接纳水平 β_w^{best} 的大致范围。然后针对不同的 $\beta_{w,k}$ 的值分别计算对应所有风况的总的综合成本的大小。由以上分析可以知道,在优化得到的多个 $\beta_{w,k}$ 值的范围内有一个最佳的系统风电接纳水平值 β_w^{best} 使总的综合成本达到最小,若风电接纳水平小于该值将会造成风电出力较小,从而使常规机组运行成本增大,同时降低了风资源的利用率;若风电接纳水平大于该值将会使风电弃风量增大,二者均会增大总的综合成本。因此,随着 $\beta_{w,k}$ 的递增,总的综合成本大致呈抛物线的形式先递减后递增,由此可以知道系统最佳的风电接纳水平值一定位于使总的综合成本最小的 $\beta_{w,k}$ 值的附近。基于上述规律,可以分别采用牛顿插值法和二分逼近的方法,根据不同风况优化得到的 $\beta_{w,k}$ 值,计算总的综合成本,以总的综合成本最小为目标,得到最佳风电接纳水平值。

2 求解算法

本文模型中待优化的变量不仅有各机组的出力值,还有风电接纳水平 β_w 的值,其中 β_w 是一个变化范围较大的值,因此必须选取合适的权重系数来平衡常规机组运行成本和风电场弃风量的目标值。本文首先针对每一种风况 k 采用粒子群算法,考虑系统运行的各种约束对一天24 h内各机组在每个小时的机组组合、出力大小及 $\beta_{w,k}$ 值进行求解。

2.1 粒子群算法

粒子群算法(PSO)^[12-14]是模拟鸟类捕食的一种随机模拟社会行为,它的优化程序简单,收敛快,在电力系统经济调度中应用广泛。

粒子群算法在每一次迭代中通过更新自己的位置来逐步逼近最优解,粒子通过两个“极值”来更新自己的位置:个体极值 P_{best} 和全局极值 g_{best} ,更新过程见文献[14],具体算法流程如下。

1) 读入机组参数、风电场参数以及负荷参数并按优先顺序法确定机组组合。

2) 根据机组组合生成满足约束条件的初始值,本文取种群大小 $P_{\text{size}}=60$,火电机组数为 n ,风电场数为 m ,则每个时段各机组出力的初始种群大小为 $P_{\text{size}} \times (n+m)$,风电出力水平 β_w 的初始种群大小为 $P_{\text{size}} \times m$ 。

3) 根据目标函数的计算值确定每个种群的适应度值,确定种群的个体极值 P_{best} 和全局极值 g_{best} 。

4) 根据个体极值 P_{best} 和全局极值 g_{best} 更新粒子速度和粒子位置。

5) 将更新后的粒子的适应度值与个体极值进行比较,更新当前的个体极值;再将其与全局极值比较,更新当前的全局极值。

6) 判断迭代次数是否满足要求,本文取迭代次数为200。若满足迭代次数,则退出迭代,转至步骤7),否则重复步骤4)~6)。

7) 输出优化结果,包括机组组合、包括风电场的所有出力以及该风况对应的 $\beta_{w,k}$ 。

2.2 最佳风电接纳水平的确定方法

2.2.1 牛顿插值法确定最佳风电接纳水平

牛顿插值法是根据函数 $P(x)$ 在某一区间上的已知的函数值拟合得到 $P(x)$ 的近似多项式,式(10)为牛顿插值多项式的表达式。该方法的特点是能保证已知点的值准确地分布于近似曲线上,避免了在曲线拟合过程中改变函数值的变化趋势,适用于研究已知函数值的变化趋势满足一定规律但非对称的未知变量的确定。

$$P_n(x) = f(x_0) + f[x_0, x_1](x-x_0) + f[x_0, x_1, x_2](x-x_0) \cdot (x-x_1) \cdots + f[x_0, x_1, \dots, x_n](x-x_0) \cdots (x-x_{n-1}) \quad (10)$$

式中: $f[x_0, x_1]$ 为函数 $f(x)$ 关于 x_0 、 x_1 的一阶均差; $f[x_0, x_1, x_2]$ 为函数 $f(x)$ 的二阶均差;以此类推 $f[x_0, x_1, \dots, x_n]$ 为 $f(x)$ 的 n 阶均差。

由于系统总的综合成本的变化趋势类似为抛物线,因此本文采用二次的牛顿插值多项式来拟合

考虑调度的总的综合成本与 $\beta_{w,k}$ 值的关系, 然后根据函数关系式确定最小值点。

2.2.2 逼近法确定综合风电接纳水平

按照上述粒子群算法步骤对 f 组风电数据进行优化得到对应的 f 个 $\beta_{w,k}$ 值, 根据上述分析可知系统对整个风电场的最佳接纳水平 β_w^{best} 的取值对总的综合成本的影响满足一定的规律性, 可以通过计算确定 β_w^{best} 的取值范围, 因此可以参考二分法的原理来逐步逼近精确值。具体步骤为:

1) 将一组 $\beta_{w,k}$ 按从小到大进行排序, 对每一个 $\beta_{w,k}$ 分别计算对应所有风况的总的综合成本, 确定最小综合成本所对应的风电接纳水平 β_w^{best} 。

2) 根据排序结果, 分别取 β_w^{best} 前后两个数据 $\beta_w^{\text{best}-1}$ 和 $\beta_w^{\text{best}+1}$, 取 $\beta_1 = (\beta_w^{\text{best}-1} + \beta_w^{\text{best}+1})/2$, 则 $\beta_w^{\text{best}-1}$ 、 β_1 、 β_w^{best} 、 β_2 、 $\beta_w^{\text{best}+1}$ 构成新的一组区间长度更小的最佳风电接纳水平值区间。

表 1 机组最大爬坡速度

Table 1 Maximal ramp velocity of units

机组编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_i^{\text{up}} / (\text{p.u./min})$	0.06	0.032	0.025	0.02	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02	0.02
$r_i^{\text{down}} / (\text{p.u./min})$	0.06	0.032	0.025	0.02	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02	0.02

3.2 仿真计算分析

3.2.1 考虑不同风况的风电接纳水平确定

基于不同季节不同时间段风电出力受风速影响较大的特点, 本文取不同季节的典型数据, 针对不同风况优化得到最佳风电接纳水平 $\beta_{w,k}$, 优化结果如表 2 所示。对每一个 $\beta_{w,k}$ 分别计算该 $\beta_{w,k}$ 值在一组典型风电出力数据的情况下的总的综合运行成本, 它与 $\beta_{w,k}$ 的关系如图 1 所示。由该曲线可以看出, 总的综合成本与 $\beta_{w,k}$ 的关系大致为抛物线形式, 与上述分析相符。按照总的综合运行成本最小这一指标确定该地区的综合最佳风电接纳水平 β_w^{best} , 该值为当前出力水平的倍数, 可以作为风电场规划的一个导向。

表 2 风电场 w 的风电接纳水平优化结果

Table 2 Wind power acceptance level of wind farm w

风况 k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\beta_{w,k}$	3.319 8	1.010 7	1.479 0	4.875 5	1.589 4	3.895 1	1.438 3	11.763 6	10.514 9	6.560 6	3.544 9	17.580 2

3.2.2 确定综合风电出力值的牛顿插值法和逼近法比较

二次牛顿插值多项式由三个点确定, 拟合的结

3) 将新的一组风电接纳水平值按步骤 1) 的方法重新计算得到新的 β_w^{best} 。

4) 判断 β_w^{best} 是否满足精度要求, 判断条件为 $\max(\Delta\beta_-, \Delta\beta_+) < \varepsilon$ (ε 为一个较小的值), $\Delta\beta_-$ 、 $\Delta\beta_+$ 为 β_w^{best} 与相邻两个数的差值。若满足精度要求, 则转至步骤 5), 若不满足则转至步骤 2)。

5) 输出满足精度要求的最佳风电接纳水平值 β_w^{best} 以及总的综合成本。

3 算例分析

3.1 算例参数

本文采用含 1 个风电场和 10 台常规机组的系统进行计算分析, 调度周期为 1 天, 分为 24 个时段, $\Delta t=1 \text{ h}$, 各机组参数及负荷数据见文献[15], 机组爬坡速度限制如表 1 所示。某地区风电场出力的典型数据见附录表格, 对应 12 种风况, 即模型中 $f=12$; 含风电的系统备用容量取负荷的 10%。

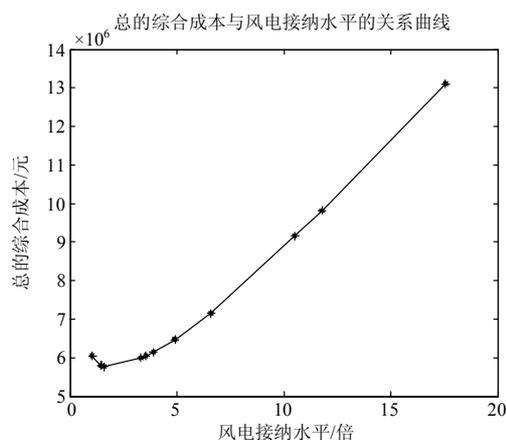


图 1 总的综合运行成本与 $\beta_{w,k}$ 的关系

Fig. 1 Relationship between total integrated operation cost and $\beta_{w,k}$

果受插值点的影响较大。根据图 1 可以知道系统最佳风电接纳水平 β_w^{best} 值的大致范围为 [1.5, 3.3]。为了提高拟合的精度, 选取这一范围附近的点进行多

次拟合得到多项式最低点然后取平均值作为最终的最佳风电接纳水平。根据插值多项式可得总的综合成本最低点对应的 β_w^{best} 值为 1.796 2, 总的综合成本计算值为 5.766×10^6 元, 由逼近法计算得到的 β_w^{best} 值为 1.734 9, 总的综合成本为 5.764×10^6 元, 两种方法所得到的 β_w^{best} 值比较接近。通过总的综合成本的比较可以看出逼近法相对牛顿插值法更加准确, 牛顿插值法受插值点选取的影响较大, 但牛顿插值法简便快速, 且运行时间远远少于逼近法。

4 结论

电力系统的调度受调度模型的影响, 本文采用的综合考虑常规机组运行成本和风电弃风成本的调度模型兼顾了常规机组和风电场运行的经济效益, 在二者之间取得了一个最佳平衡点, 是比较合理的调度模型。由分析可以知道, 只有在综合考虑常规

机组运行成本和风电弃风成本的调度模型下确定的风电接纳水平才具有一定的指导意义。否则, 仅考虑常规机组运行成本的调度模式下将使风电接纳水平过高而造成大量弃风, 仅考虑弃风成本的调度模式将使风电接纳水平过低而增加煤耗量。

综合最佳风电接纳水平可以作为风电场投资规划的一个依据, 该依据是在综合考虑常规机组与风电场效益的基础上成立的。采用牛顿插值法与逼近法确定某一风电场的综合最佳风电接纳水平可以得到一个较准确的解, 牛顿插值法相对简便快速, 只需要在第一次计算中考虑长期调度成本, 但二次牛顿插值多项式的最小值受所选的插值点的影响较大, 是一种近似的拟合, 有一定的误差。逼近法能够得到一种满足更小精度要求的解, 但是在每一次逼近的过程中均要考虑长期的调度成本, 所需要的时间远远长于牛顿插值法。

附录

表 1 风电出力典型数据

Table 1 Typical data of wind power output

MW

时段	风况 k											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	118.0	326.5	333.7	242.3	76.3	320.2	419.6	9.8	76.5	224.7	73.3	11.1
2	32.5	254.2	228.0	222.1	159.1	213.4	369.3	0.8	71.7	172.6	95.1	9.7
3	14.5	259.9	275.5	208.5	146.4	61.0	339.2	19.9	65.3	137.3	83.4	7.6
4	13.7	200.3	367.5	164.9	204.1	124.9	294.0	17.5	45.7	126.9	58.9	7.2
5	26.9	142.0	397.7	114.8	134.2	143.7	413.0	0	45.1	100.1	98.0	8.2
6	19.7	94.0	452.4	122.1	110.4	97.3	501.5	0	59.4	78.3	87.8	13.4
7	21.2	107.6	492.8	141.5	112.8	132.1	520.9	0	56.6	95.3	90.3	14.7
8	17.3	57.3	503.3	144.5	102.5	297.3	526.6	0	26.7	124.8	63.3	41.4
9	7.8	25.7	495.8	126.7	94.6	306.6	528.3	0	52.9	114.7	63.8	64.2
10	4.5	1.8	500.3	138.0	51.6	301.3	528.2	0	14.2	110.3	109.6	50.0
11	3.3	0	503.9	262.0	109.5	264.1	521.8	12.3	0	134.6	194.7	32.0
12	3.9	0	455.1	258.7	30.2	263.5	522.5	32.5	0	138.7	300.5	34.4
13	41.7	0	496.1	167.0	4.3	222.8	515.6	33.5	0	105.8	236.9	40.7
14	118.0	0	469.5	128.1	0	162.5	524.1	56.4	0	86.7	170.7	58.6
15	157.6	0	502.2	181.1	5.9	147.1	526.4	50.7	0	109.8	278.9	52.9
16	179.2	0	472.9	90.5	4.7	133.3	520.3	54.8	0	113.7	454.4	49.8
17	175.3	0	501.7	63.9	3.1	137.3	525.1	67.0	0	81.7	489.9	41.0
18	188.2	0	515.7	49.6	352.2	152.3	527.7	53.1	0	55.8	321.6	24.2
19	229.6	16.0	524.6	31.5	528.7	130.8	498.2	53.2	0	49.2	283.4	33.9
20	207.9	8.3	522.2	6.3	528.4	94.9	450.4	65.2	0	53.0	172.1	29.1
21	211.5	16.8	513.7	14.1	528.2	61.5	443.2	128.6	0	40.5	120.3	43.1
22	287.8	2.4	525.3	5.0	527.4	40.8	383.1	98.9	0	40.2	60.8	24.8
23	339.7	0	528.1	0.9	526.7	20.4	353.9	73.8	0	44.4	61.7	27.0
24	321.8	0	440.0	0	439.9	2.2	366.7	37.3	0	45.6	72.4	19.3

参考文献

- [1] 董永平, 何世恩, 刘峻, 等. 低碳电力视角下的风电消纳问题[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 12-16.
DONG Yongping, HE Shien, LIU Jun, et al. Wind power

- consumption problem in the view of low carbon power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 12-16.
[2] 刘新东, 方科, 陈焕远, 等. 利用合理弃风提高大规模

- 风电消纳能力的理论研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 35-39.
- LIU Xindong, FANG Ke, CHEN Huanyuan, et al. Research on rational wind power casting theory for large-scale wind power integration improvement[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 35-39.
- [3] 胡国伟, 别朝红, 王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 58-65.
- HU Guowei, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operation reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 58-65.
- [4] 韩小琪, 孙寿广, 戚庆茹. 从系统调峰角度评估电网接纳风电能力[J]. 中国电力, 2010, 43(6): 16-19.
- HAN Xiaoqi, SUN Shouguang, QI Qingru. Evaluation of acceptance of wind power capacity of system from the perspective of peak regulation[J]. Electric Power, 2010, 43(6): 16-19.
- [5] 刘畅, 吴浩, 高长征, 等. 风电消纳能力分析方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 61-66.
- LIU Chang, WU Hao, GAO Changzheng, et al. Study on analysis method of accommodated capacity for wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 61-66.
- [6] 闫广新, 施海, 刘新刚, 等. 电网在调峰能力约束下接纳风电能力的估算[J]. 电力与能源, 2012, 33(3): 260-262.
- YAN Guangxin, SHI Hai, LIU Xingang, et al. Estimation of acceptance of wind power capacity in the system constraints of peak regulation ability[J]. Power and Energy, 2012, 33(3): 260-262.
- [7] 杨宏, 刘建新, 苑津莎. 风电系统中常规机组负调峰能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 26-31.
- YANG Hong, LIU Jianxin, YUAN Jinsha. Research of negative peak load regulation capacity of conventional units in power systems with wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 26-31.
- [8] 胡剑琛, 刘燕华, 李献, 等. 风电并网后电网调峰措施的经济性分析[J]. 现代电力, 2012, 29(1): 86-89.
- HU Jianchen, LIU Yanhua, LI Xian, et al. Economical analysis of peak regulation solutions in grid with wind power[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(1): 86-89.
- [9] 谢国辉, 李琼慧, 高长征. 风电弃风电量的计算方法与模型[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(2): 95-100.
- XIE Guohui, LI Qionghui, GAO Changzheng. Calculation method and model of wind curtailment in wind farm[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(2): 95-100.
- [10] 张粒子, 周娜, 王楠. 大规模风电接入电力系统调度模式的经济性比较[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 105-110.
- ZHANG Lizi, ZHOU Na, WANG Nan. Economical comparison of dispatching models in power system with large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 105-110.
- [11] 江岳文, 温步瀛. 从调度模式经济性角度评估电网风电出力接纳能力[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(4): 54-60.
- JIANG Yuewen, WEN Buying. Evaluation of acceptance of wind power capacity in grid from economy of dispatching model[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(4): 54-60.
- [12] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 99-104.
- HOU Yunhe, LU Lijuan, XIONG Xingen, et al. Improved particle swarm algorithm and its application in power system economic load distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 99-104.
- [13] 江岳文, 陈冲, 温步瀛. 含风电场的电力系统机组组合问题随机模拟粒子群算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 129-136.
- JIANG Yuewen, CHEN Chong, WEN Buying. Partical swarm research of stochastic simulation for unit commitment in wind farms integrated power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 129-136.
- [14] 唐贤伦, 张衡, 李进, 等. 基于多 Agent 粒子群优化算法的电力系统经济负荷分配[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 42-47.
- TANG Xianlun, ZHANG Heng, LI Jin, et al. Multiple Agent particle swarm algorithm based economic load distribution in power system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 42-47.
- [15] GAING Z L. Discrete particle swarm optimization algorithm for unit commitment[C] // Proceeding of IEEE Power Engineering Society General Meeting, Toronto, 2003: 418-424.

收稿日期: 2014-12-05; 修回日期: 2015-02-03

作者简介:

林小雨(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与电力市场; E-mail:sandr888@163.com

江岳文(1977-), 女, 副教授, 研究方向为电力系统优化运行与电力市场;

温步瀛(1967-), 男, 教授, 研究方向为电力系统优化运行与电力市场。

(编辑 葛艳娜)