

# 考虑风火电经济社会效益的风电装机规划 多目标优化方法

赵 传<sup>1</sup>, 戴朝华<sup>1</sup>, 袁 爽<sup>1</sup>, 陈维荣<sup>1</sup>, 廖国栋<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031; 2. 国家电网湖南省电力公司经济技术研究院, 长沙 410004)

**摘 要:** 为引导有序有效的风电装机规划,在减少各方成本、提高各方利益的同时保护环境并节约能源,提出一种基于多目标优化的考虑风火电经济社会效益的风电装机规划方法。首先建立风火电的经济社会效益多目标优化模型,着重分析风电场的经济社会效益,及定量风电消纳后对火电机组组合影响所带来的经济性偏差,随后求解该模型的非支配解集,得到其 Pareto 前沿,并采用一种基于模糊理论的方法从 Pareto 前沿中得出最终优化方案。最后,针对某省电网实际数据进行仿真求解,得出几种该省的风电装机规划方案,并进行对比,供决策者参考选取。通过与实际风电装机下的各项数据进行对比,表明本文所提方法对风电规划指导具有一定的参考意义。

**关键词:** 风电; 风电成本; 多目标优化; Pareto 前沿; 模糊理论

**中图分类号:** TM614

**文献标识码:** A

## 0 引 言

风能作为一种可再生能源,具有分布广泛、清洁无污染等特点而脱颖而出<sup>[1]</sup>。因此,制定有效策略规划风电装机具有重大意义。

目前,对于风电装机规划的研究往往是基于单方利益考虑的<sup>[2-4]</sup>。文献[2,3]分析了风电运维费及建设投资费,建立以风电场净收益最大为目标的风电装机规划模型。文献[4]通过分析火电机组出力极限,基于风电场效益,提出一种最大化风电装机量的规划方法。由于大规模风电具有出力不确定性、反调峰性等特点<sup>[5]</sup>,以上研究均未考虑风电接入对火电机组的启停、出力改变,忽略了风电接入对火电厂经济效益的巨大影响。而对于接入风电系统的火电经济性讨论,目前往往是基于定量风电装机下进行研究<sup>[6-8]</sup>。文献[6,7]计及大规模风电接入电力系统,考虑安全约束,以火电机组运行经济效益最优为目标,对火电机组进行规划调度。文献[8]以规划总成本最小为目标,对火电厂的快速响应机组进行投资规划设计,拟解决风电间歇性和波动性特征引起的电网安全性问题。但由于风电所带来

的社会效益未计入风电综合效益中,形成了风电与传统能源相比竞争力不足的局面,因此考虑风电社会效益对实际风电规划具有重要价值<sup>[9,10]</sup>。

综上,本文提出一种考虑风火电经济社会效益的风电装机规划多目标优化方法,着重分析风电场的经济社会效益,以及不同容量风电接入系统后,对火电厂机组组合影响所带来的火电厂经济性偏差。最后对某省电网数据进行建模仿真,实现风火电经济社会效益的多目标优化求解,并采用基于模糊理论的方法得出该省风电规划的几种最优方案,供决策者选取。得出的计算结果通过与实际方案下的各项数据进行对比,表明本文所提方法对风电装机规划具有一定参考意义。

## 1 考虑风火电经济社会效益的多目标风电装机规划模型

### 1.1 风电场经济社会效益

风电场作为风电发电方,其成本主要分为两部分:1)风电场的初期建设成本;2)后期发电的运行维护成本。由于本文在讨论经济性时,讨论风电机

组的全寿命情况下的年均收益,因此风电场初期建设成本以折旧费的方式进行讨论,以便分析其年收益。而风电场的经济性收入不仅来自国网企业的购电收入,同时国家也给予其作为新能源发电项目一定的补贴。

风电场的初期建设成本分为风力发电机组设备费、风电场基础设施建设费、风电并网费等。风电场初期建设成本的年折旧费<sup>[11]</sup>为:

$$W_1 = \frac{W_s i_b}{1 - (1 + i_b)^{-t_s}} \quad (1)$$

式中,  $i_b$  —— 银行利率, %;  $t_s$  —— 风电机组的寿命年限, 一般取 20 a;  $W_s$  —— 风电场的初期建设成本费用, ¥, 其表达式为:

$$W_s = \frac{Zl}{0.78} \quad (2)$$

式中,  $Z$  —— 风电规划装机量, kW;  $l$  —— 单位风电装机的成本, ¥/kW。

国产品牌和外资品牌的单位千瓦价格差距较大<sup>[12]</sup>, 中国的华锐风力机采购价格约为 3600 ¥/kW, 而进口的西班牙 Gamesa 风力机采购价格约为 6200 ¥/kW。由于风力机发电机组设备费用占据初期建设总成本的 74%~82%, 相比于其他常规能源的发电设备较高<sup>[13]</sup>, 本文取 78% 为风电发电设备的占比。

风电场的运行维护成本指的是风电场建设完成后的运行维护费用, 其计算方式为:

$$W_2 = 365 Z_p Q \quad (3)$$

式中,  $Q$  —— 风电场平均运行维护费用, 我国的风电场平均运行维护费用约为 0.05 ¥/kWh<sup>[14]</sup>;  $Z_p$  —— 年典型日的风电出力值, 其表达式为:

$$Z_p = \sum_{t=0}^{24} P'_{ratio} Z \quad (4)$$

式中  $P'_{ratio}$  —— 年典型日的第  $t$  时段的风电出力同时率, %;  $Z$  —— 风电规划装机量, kW。

对于风电场而言, 其收入分为 2 部分, 一部分为电网企业向其支付的上网电量购入费, 其计算公式为:

$$W_3 = Z_p S \quad (5)$$

式中,  $S$  —— 风电的上网电价, ¥/kWh。

中国的风电上网电价政策已过渡到了分区域标杆定价阶段, 约为 0.51~0.63 ¥/kWh<sup>[15]</sup>。

另一部分收入来自国家政策补贴<sup>[16]</sup>, 最主要的补贴为给予符合补贴条件的风电机组按 600 ¥/kW 进行补贴, 假设所购风力机均满足补贴条件, 则其年均补贴值为:

$$W_4 = \frac{600Z}{t_s} \quad (6)$$

传统的发电能源在发电过程中对环境造成严重的破坏, 而风力发电在节能与环保方面具有天然的优势, 风电既能够避免氮氧化物及粉尘的排放, 也可以降低温室气体的排放, 具有明显的社会效益<sup>[17]</sup>。文献[18]对风电的社会效益进行了分析, 主要包括风电的减排效益、节水效益、节煤效益、节约运输力效益以及削减风害的效益, 并对这些效益进行了量化, 得出风电的社会效益  $B$ , 可得出风电场的年社会效益为:

$$W_5 = Z_p B \quad (7)$$

## 1.2 多目标风电装机规划模型

风电场的经济社会效益随着风电装机量的增加而提高, 但由于风电的不确定性、随机性, 不仅会减少电网对火电需求量, 同时改变火电机组在各时段的启停与出力, 严重影响火电厂的经济效益。因此应综合考虑风火电的经济社会效益对风电装机进行规划。

本文认为风电作为清洁能源, 在优先考虑全额消纳的前提下, 建立考虑风电场、火电厂年收益的多目标规划模型, 具体为:

$$\max : W = \sum_{i=3}^{5(4)} W_i - \sum_{i=1}^2 W_i \quad (8)$$

$$\max : F = 365 \times F'$$

式中,  $W$  —— 风电场的年收益, ¥;  $F$ 、 $F'$  —— 火电厂的年收益及火电厂年典型日的日收益, ¥。

具体为日收入与传统的日机组组合运行费之差, 即:

$$F' = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [P_{i,t} O - I_{i,t} F(P_{i,t}) - I_{i,t} (1 - I_{i,t}) S_{i,t}] \quad (9)$$

式中,  $F(P_{i,t})$  —— 机组煤耗费用, ¥, 如式(10)所示;  $S_{i,t}$  —— 启动费用, ¥, 分为热启动费用和冷启动费用<sup>[7]</sup>, 如式(11)所示;  $T$  —— 调度周期, h;  $I_{i,t}$  —— 机组  $i$  在时段  $t$  的运行状态, 0 或 1;  $P_{i,t}$  —— 机组  $i$  在时段  $t$  的有功出力, MW;  $O$  —— 火电上网

价格, ¥/kWh。

$$F(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (10)$$

$$S_{i,t} = \begin{cases} S_{H,t}, M_{\text{off},i} \leq T_{\text{off},i,t} \leq M_{\text{off},i} + T_{C,i} \\ S_{C,t}, T_{\text{off},i,t} \geq M_{\text{off},i} + T_{C,i} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  ——系统的煤耗参数;  $S_{H,t}$ 、 $S_{C,t}$  ——机组热启动费用和冷启动费用, ¥;  $M_{\text{off},i}$  ——机组  $i$  的最小停机时间, h;  $T_{\text{off},i,t}$  ——机组  $i$  在时段  $t$  已停机的时段数, h;  $T_{C,i}$  ——冷启动时间, h。

多目标风电装机规划模型的约束条件包括装机量约束、有功功率平衡约束、旋转备用约束、出力上下限约束以及爬坡约束, 如式(12)所示, 第1行为功率平衡约束;

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N I_{i,t} P_{i,t} + P_{w,t} - L_t = 0 \\ \sum_{i=1}^N I_{i,t} P_{i,\max} + P_{w,t} \geq L_t + R_t \\ P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \\ P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_{\text{up},i}, P_{i,t} \geq P_{i,t-1} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq P_{\text{down},i}, P_{i,t} \leq P_{i,t-1} \\ Z \leq Z_m \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $L_t$  ——时段  $t$  的负荷需求, MW; 第2行为旋转备用约束; 第3行为出力上下限约束; 第4行、第5行表示爬坡约束; 第6行表示风电装机约束,  $R_t$  ——时段  $t$  的旋转备用需求, MW;  $P_{i,\max}$  ——机组  $i$  的最大出力, MW;  $P_{\text{up},i}$  ——机组  $i$  的最大上升功率, MW;  $P_{\text{down},i}$  ——机组  $i$  的最大下降功率, MW;  $Z_m$  ——最大装机量, kW;  $P_{w,t}$  ——风电在时段  $t$  的出力值, MW, 其表达式为:

$$P_{w,t} = P^{\text{ratio}} Z \quad (13)$$

## 2 多目标风电装机规划模型求解方法

### 2.1 Pareto 前沿的求解

多目标问题的求解方法主要分为2类: 第1类为矢量化算法, 如多目标进化算法, 该方法可直接对解进行搜索, 并在搜索过程中不断地更新 Pareto 前沿, 但具有较强的随机性; 第2类为标量法, 如物理规划法、权重法等, 该类算法有较高的求解效率, 但当目标函数不在同一数量级时 Pareto 前沿会不均匀。归一化法线约束法<sup>[19]</sup>通过归一化目标函数的解空间并连接两个单目标最优点得到乌托邦线, 然后通过作法线的方式等分解空间为  $M$  段, 将多目

标问题转化为单目标求解, 获得较为均匀的 Pareto 前沿, 因此本文采用该方法对多目标风电装机规划模型进行求解。具体步骤如下:

1) 获取锚点。目标函数  $W$  与  $F$  为极大值问题, 为了便于计算, 在求解过程中取其负数  $W_f$  和  $F_f$ , 转换为极小值问题。分别求取单目标  $W_f$  和  $F_f$  的最优解  $F_{W_f}(x_{W_f}, y_{W_f})$  和  $F_{F_f}(x_{F_f}, y_{F_f})$ 。其中,  $x_{W_f}$ 、 $y_{W_f}$  分别表示以单目标  $W_f$  最优时, 目标函数  $W_f$  和  $F_f$  对应的数值; 相应的,  $x_{F_f}$ 、 $y_{F_f}$  分别表示以单目标  $F_f$  最优时, 目标函数  $W_f$  和  $F_f$  对应的数值。

2) 归一化。定义乌托邦原点为  $F_o(x_{F_f}, y_{W_f})$ 。定义  $l_1$ 、 $l_2$  为归一化计算中单目标  $W_f$  和  $F_f$  原点间的差值, 见式(14), 归一化计算公式如式(15)所示:

$$l_1 = x_{F_f} - x_{W_f} \quad (14)$$

$$l_2 = y_{W_f} - y_{F_f}$$

$$F = \left( \frac{x - x_{W_f}}{l_1}, \frac{y - y_{F_f}}{l_2} \right) \quad (15)$$

式中,  $l_1$ 、 $l_2$  ——单目标最优解  $F_{W_f}$  与  $F_{F_f}$  在横纵坐标轴上的距离;  $x$ 、 $y$  ——待归一化点的实际值;  $F$  ——求解过程中非支配解归一化后的坐标点。

3) 乌托邦向量。定义乌托邦线向量  $U$  的方向为由  $F_{F_f}(x_{F_f}, y_{F_f})$  指向  $F_{W_f}(x_{W_f}, y_{W_f})$ , 如式(16)所示:

$$U = (x_{W_f} - x_{F_f}, y_{W_f} - y_{F_f}) \quad (16)$$

4) 乌托邦等分点。将乌托邦线均匀地划分为  $M$  个等分点, 等分点的坐标为:

$$\bar{X} = \left[ \left( 1 - \frac{k}{M} \right) F_{F_f}, \frac{k}{M} F_{W_f} \right], k \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (17)$$

5) 求 Pareto 点。以  $F_f$  最小为目标函数, 增加式(18)所示的约束条件, 得到新的单目标模型。

$$U(F - X) \leq 0 \quad (18)$$

归一化法线约束法求解步骤如图1所示。约束条件式(18)的引入, 使得原单目标模型的解空间变为图2阴影部分。对每一个等分点, 求解该模型便能得到 Pareto 前沿上的一个点。

6) 确定全局 Pareto 前沿。对于非凸问题, 分段求解后, 有可能会局部最优解, 需要对所得的 Pareto 解集进行筛选, 获得全局 Pareto 前沿, 最后采取文献[19]中的方法将归一化的 Pareto 前沿中的数值还原为目标函数的实际值。

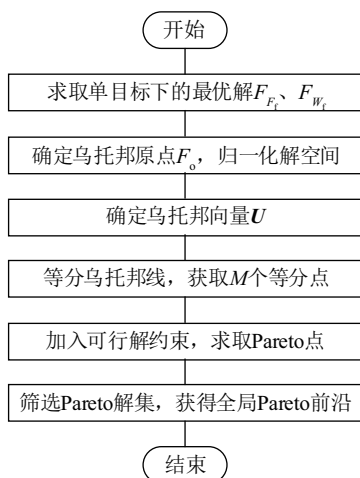


图1 多目标求解方法流程图

Fig. 1 Flow chart of multi-objective solution method

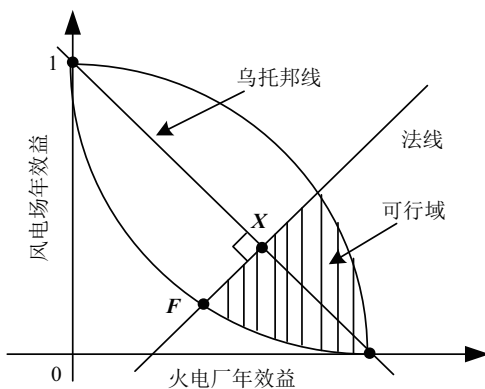


图2 归一化约束法求解示意图

Fig. 2 Sketch map of normalized normal constraint

## 2.2 折中解的求取

得到 Pareto 前沿只是求解的第一步,还需要从

中选取能够权衡 2 个目标的折中解,作为规划人员可选取的折中方案。有学者将模糊理论应用到 Pareto 前沿的折中解求取<sup>[20,21]</sup>。具体步骤如下:

1) 计算模糊集。模糊集由式(19)所示的隶属函数确定:

$$\alpha_i = \begin{cases} 0, & f_i \geq f_{i,\max} \\ \frac{f_{i,\max} - f_i}{f_{i,\max} - f_{i,\min}}, & f_{i,\min} \leq f_i \leq f_{i,\max} \\ 1, & f_i \leq f_{i,\min} \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $f_{i,\max}$ 、 $f_{i,\min}$  —— Pareto 解集中第  $i$  个目标函数的最大值和最小值。

2) 计算隶属函数值。对于每一个 Pareto 解,经标准化的隶属函数值  $\alpha_j$  可由式(20)计算得出:

$$\alpha_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} \alpha_{i,j}}{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{N_{obj}} \alpha_{i,j}} \quad (20)$$

式中,  $K$  —— Pareto 前沿中解的个数;  $N_{obj}$  —— 目标函数个数,选取集合  $\{\alpha_j\}$  中较大值所对应的解作为折中解。

## 3 算例分析

以某省 2015 年的风火电数据进行建模分析,该省 2015 年风电装机量为 1930 MW,火电机组装机容量为 27300 MW,风电上网标杆电价为 0.62 元/kWh,火电上网电价为 0.32 元/kWh,风电机组设备选取华润风力机。典型日数据如表 1 所示,其中负荷为非水火的各异质能源边界出力条件下的等效负荷。

表1 某省2015年典型日数据

Table 1 Data of the province typical day

时段	1	2	3	4	5	6	7	8
$L/\text{MW}$	21666	20841	20428	19879	19491	19426	19770	22015
$P_{\text{ratio}}/\%$	0.1782	0.1781	0.1820	0.1814	0.1825	0.1839	0.1833	0.1839
时段	9	10	11	12	13	14	15	16
$L/\text{MW}$	23172	24359	24419	24771	24452	24479	24911	24777
$P_{\text{ratio}}/\%$	0.1798	0.1715	0.1581	0.1500	0.1402	0.1345	0.1306	0.1321
时段	17	18	19	120	21	22	23	24
$L/\text{MW}$	24777	24695	24849	24635	24387	24006	23729	23328
$P_{\text{ratio}}/\%$	0.1342	0.1395	0.1514	0.1610	0.1746	0.1779	0.1782	0.1795



### 3.1 风电社会效益对风电装机规划的影响

以 Matlab 作为仿真平台,不计风电社会效益时,所得 Pareto 前沿如图 3 所示。计算 Pareto 前沿中每个解的模糊隶属度  $\alpha$ ,如图 4 所示。

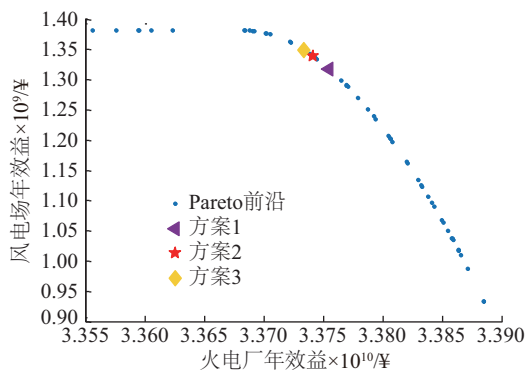


图3 Pareto 前沿(不计风电社会效益)

Fig. 3 Pareto front (without wind power social benefit)

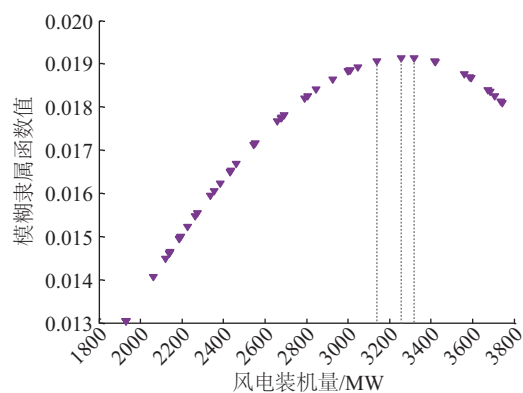


图4 Pareto解隶属函数值(不计风电社会效益)

Fig. 4 Membership function of Pareto solutions (without wind power social benefit)

由图 4 可知,若不考虑风电社会效益计算风电场年效益,当装机量低于约 3200 MW 时,随着风电装机量的增加,隶属函数值呈递增趋势,在 3300 MW 后,隶属函数值则随着装机量的增加而递减。本文选取 3 个最大隶属函数值所对应的 3 种方案作为优选风电装机规划方案,并标记于图 3 的 Pareto 前沿中,各方案计算结果如表 2 所示。

类似,计及风电社会效益计算风电场年效益时,所得仿真结果如图 5、图 6 所示。由图 6 可知,当计及风电社会效益计算风电场年效益时,隶属度函数在风电装机量约为 4000 MW 出现极大值,此时优选方案在 Pareto 前沿中的位置如图 5 所示,具体情况如表 3 所示。

表2 本文优选方案(不计风电社会效益)

Table 2 Preferred plan (without wind power social benefit)

规划方案	风电装机量/ MW	火电厂年效益/ 亿¥	风电场年效益/ 亿¥	隶属度
方案1	3137	337.3	13.49	0.01906
方案2	3320	337.4	13.39	0.01913
方案3	3255	337.5	13.18	0.01914

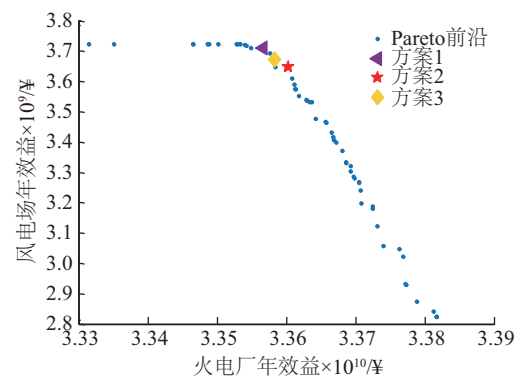


图5 Pareto 前沿-计及风电社会效益

Fig. 5 Pareto front-considering wind power social benefit

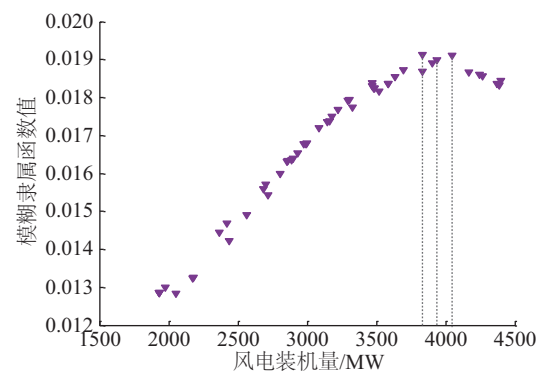


图6 Pareto解隶属函数值-计及风电社会效益

Fig. 6 Membership function of Pareto solutions-considering wind power social benefit

表3 本文优选方案-计及风电社会效益

Table 3 Preferred plan-considering wind power social benefit

规划方案	风电装机量/ MW	火电厂年效益/ 亿¥	风电场年效益/ 亿¥	隶属度
方案4	4162	335.7	37.11	0.0191
方案5	3831	336.0	36.48	0.0194
方案6	3936	335.8	36.73	0.0189

从表 2、表 3 中可看出：

1) 对于火电厂年效益与风电场年效益,无论是否计及风电社会效益,其中一个目标的优化是以另一个目标的劣化为代价的。2) 考虑风电社会效益对风电装机进行规划时,各优选方案的装机量相比单纯讨论经济性时均有较大增幅。

### 3.2 优选方案与实际方案对比

不计风电社会效益时,优选方案与实际方案对比如表 4 所示。由表 4 可知,在不计风电社会效益进行风电装机规划时,本文优选方案与实际方案相比,风电装机量增加约 68%,带来的积极影响为风电场年效益增加约 43%,代价仅为火电厂年效益降低约 0.43%。

表 4 优选方案与实际方案对比-不计风电社会效益  
Table 4 Comparison of preferred plan and actual plan-without wind power social benefit

规划方案	风电装机量/ MW	装机量 增比/%	火电 年效益/ 亿¥	火电 年效益 增比/%	风电 年效益/ 亿¥	风电 年效益 增比/%
实际方案	1930	—	338.8	—	9.34	—
方案 1	3137	62.53	337.3	-0.45	13.49	44.45
方案 2	3320	72.02	337.4	-0.43	13.39	43.39
方案 3	3255	68.65	337.5	-0.39	13.18	41.14

计及风电社会效益时,优选方案与实际方案对比如表 5 所示。由表 5 可知,计及风电社会效益进行风电装机规划时,本文优选方案与实际方案相比,风电装机量约增加一倍,在火电厂年收益仅损失不到 1%的情况下,风电场年效益得到了约 30%的增幅。

表 5 优选方案与实际方案对比(计及风电社会效益)  
Table 5 Comparison of preferred plan and actual plan (considering wind power social benefit)

规划方案	风电装机量/ MW	装机量 增比/%	火电 效益/ 亿¥	火电 效益 增比/%	风电 效益/ 亿¥	风电 效益 增比/%
实际方案	1930	—	338.8	—	28.23	—
方案 4	4162	115.6	335.7	-0.94	37.11	31.43
方案 5	3831	98.5	336.0	-0.83	36.48	29.22
方案 6	3936	103.9	335.8	-0.89	36.73	30.09

综上所述,选取一个合理的风电装机规划方案,不仅仅与多目标问题本身有关,同时也与决策者的主观意志相关。当决策者从经济性的角度出发对风电装机进行规划时,可从本文优选方案 1~3 中进行选择。而当决策者考虑到风电对社会所带来的效益时,则可从本文优选方案 4~6 中进行选择。因此,最终方案的选取是由优化求解过程和决策者决定的过程所决定的。

## 4 结 论

为引导风电有效规划,保护环境、节约能源并平衡风火电双方利益,本文分析了风电场规划运行的经济社会效益及风电消纳后对火电厂带来的经济性偏差,建立考虑双方效益的多目标模型,为风电规划人员提供可行的决策方案,具体结论如下：

1) 考虑风火电经济社会效益的风电规划属于典型的多目标优化问题,需要兼顾风火电双方的利益求取折中方案。基于某省电网数据的仿真分析,本文采用归一化法约束法及模糊理论很好地解决了该问题,在尽量少减少火电效益的情况下尽可能大地提高了风电装机容量和风电效益,有益于可再生能源的利用。

2) 当不计风电社会效益,在风电可消纳的前提下,该省风电装机量可达约 3200 MW,比现有装机量提升 68%,带来约 63%风电经济效益的同时,仅损失火电厂约 0.43%的效益。

3) 当计及风电社会效益,在风电可消纳的前提下,该省风电装机量可达约 4000 MW,比现有装机量提升约 1 倍,带来的风电经济社会综合效益增幅约 30%,代价仅为火电厂不到 1%的效益减幅。

本文考虑风火电经济社会效益的风电规划方法,建立在对风电预测较为精准的基础上,没有考虑风电预测的误差。下一步的研究将把风电预测的误差考虑进去,解决不确定性鲁棒规划优化问题。

### [参考文献]

- [1] 陈 贞,倪维斗,李 政. 风电特性的初步研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(2):210—215.
- [1] Chen Zhen, Ni Weidou, Li Zheng. Preliminary study on wind power characteristics [J]. Acta Energaie Solaris

- Sinica, 2011, 32(2): 210—215.
- [2] 张 旭, 罗先觉, 赵 峥, 等. 以风电场效益最大为目标的风电装机容量优化[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 237—240.
- [2] Zhang Xu, Luo Xianjue, Zhao Zheng, et al. Installed capacity optimization of wind turbine generators considering maximum economic benefit of wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 237—240.
- [3] 白玉东, 王承民, 衣 涛, 等. 基于柔性分析的风电并网容量优化建模[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 17—24.
- [3] Bai Yudong, Wang Chengmin, Yi Tao, et al. An optimization model of wind power grid-connected capacity based on flexibility analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 17—24.
- [4] 张 勇, 肖 建, 迟永宁, 等. 基于机组调峰能力的电力系统风电接纳能力研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(6): 998—1003.
- [4] Zhang Yong, Xiao Jian, Chi Yongning, et al. Study of wind power accommodated capability of grid system based on peak-load regulation of units[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2014, 35(6): 998—1003.
- [5] 包宇庆, 王蓓蓓, 李 扬, 等. 考虑大规模风电接入并计及多时间尺度需求响应资源协调优化的滚动调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4589—4600.
- [5] Bao Yuqing, Wang Beibei, Li Yang, et al. Rolling dispatch model considering wind penetration and multi-scale demand response resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4589—4600.
- [6] 吴小珊, 张步涵, 袁小明, 等. 求解含风电场的电力系统机组组合问题的改进量子离散粒子群优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 45—52.
- [6] Wu Xiaoshan, Zhang Buhan, Yuan Xiaoming, et al. Solutions to unit commitment problems in power systems with wind farms using advanced quantum-inspired binary PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 45—52.
- [7] 张粒子, 李 丰, 程世军, 等. 大规模间歇式能源并网辅助服务需求研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(8): 1345—1352.
- [7] Zhang Lizi, Li Feng, Cheng Shijun, et al. Research on ancillary services requirements for grid-connected large-scale intermittent energy[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2013, 34(8): 1345—1352.
- [8] 薛 松, 王致杰, 韩 蕊, 等. 考虑风电并网的快速响应火电机组安全经济规划模型[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2888—2895.
- [8] Xue Song, Wang Zhijie, Han Rui, et al. A secure and economic planning model for fast response thermal units considering grid-integration of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2888—2895.
- [9] 刘文霞, 凌云岷, 赵天阳. 低碳经济下基于合作博弈的风电容量规划方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 68—74.
- [9] Liu Wenxia, Ling Yundi, Zhao Tianyang. Cooperative game based capacity planning model for wind power in low-carbon economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 68—74.
- [10] 张建平, 朱忠烈, 柳 璐, 等. 大规模风电接入的输电系统价值规划方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 47—51.
- [10] Zhang Jianping, Zhu Zhonglie, Liu Lu, et al. Transmission network value planning considering large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 47—51.
- [11] 于汉启. 我国风电发展的成本与风力机选型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [11] Yu Hanqi. China's wind power development study of cost and wind power generators selection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [12] 邵 岛. 大神堂风电项目技术经济评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [12] Shao Dao. Technical and economic research on da ShenTang wind power project[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [13] 王正明, 路正南. 风电项目投资及其运行的经济性分析[J]. 可再生能源, 2008, 26(6): 21—24.
- [13] Wang Zhengmign, Lu Zhengnan. The economic analysis on the investment and operation of wind power project[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(6): 21—24.
- [14] 胡其颖. 风能利用的发展预测[J]. 可再生能源, 2005, 23(6): 75—76.
- [14] Hu Qiyang. Forecast of energy development[J]. Renewable Energy, 2005, 23(6): 75—76.
- [15] 周 莹. 促进大规模风电消纳的风电价格机制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [15] Zhou Ying. Price mechanism for large-scale wind power consumption[D]. Beijing: North China Electric Power

- University, 2013.
- [16] 黄碧斌, 李琼慧, 王乾坤. 国内外分布式电源政策法规研究[J]. 太阳能, 2013, (14): 19—22.
- [16] Huang Bibin, Li Qionghui, Wang Qiankun. Study on national and international policy of distributed power supply[J]. Solar Energy, 2013, 14: 19—22.
- [17] 杨校生. 风电场建设、运行与管理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [17] Yang Xiaosheng. Wind farm's construction, operation and management[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.
- [18] 陈通漠. 试述风电社会效益的量化[J]. 内蒙古电力技术, 1998, 16(6): 55—57.
- [18] Chen Tongmo. Study on quantification of wind power social benefit[J]. Inner Mongolia Electric Power, 1998, 16(6): 55—57.
- [19] Messac A, Ismail-Yahaya A, Mattson C A. The normalized normal constraint method for generating the pareto frontier[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2003, 25(2): 86—98.
- [20] Wang Lingfeng, Singh C. Environmental/economic power dispatch using a fuzzified multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(12): 1654—1664.
- [21] Abido M A. Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms: A comparative study [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 920—925.

## MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF WIND POWER PLANNING CONSIDERING ECONOMY-SOCIAL BENEFIT OF WIND POWER AND THERMAL POWER

Zhao Chuan<sup>1</sup>, Dai Chaohua<sup>1</sup>, Yuan Shuang<sup>1</sup>, Chen Weirong<sup>1</sup>, Liao Guodong<sup>2</sup>

(1. School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Economic & Technical Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to guide the effective wind power planning, a method of wind power planning is proposed to reduce the cost and protect the environment. At first, the multi-objective optimization model is built, which takes the economy-social benefit of wind power and thermal power into consideration. Then, the economic deviation caused by the impact of quantitative wind power on the thermal power units is emphatically analyzed. Next, the Pareto front of this model is got by calculating the non-dominated solutions, and the final optimization result is calculated by making use of the fuzzy theory. In the end, this method is applied to the actual data of a certain province's grid electric power corporation to get several wind power plans. By comparing these plans with the actual plan, the method is proved to be meaningful to wind power planning guidance.

**Keywords:** wind power; wind-power cost; multi-objective optimization; Pareto front; fuzzy theory