

基于 Pareto 折中解的风电装机规划 多目标优化方法

赵 传¹, 戴朝华¹, 周彤昕¹, 袁 爽¹, 陈维荣¹, 廖国栋²

(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, 在提高风电场经济社会效益的同时, 保证大规模风电接入系统的安全性, 提出一种基于 Pareto 折中解的风电装机规划多目标优化方法。首先建立风电装机规划的多目标模型, 研究风电场的经济社会效益及不定量风电消纳后系统负调峰能力的变化。随后通过求解该模型的非支配解, 得到其 Pareto 前沿, 并基于模糊理论从前沿中得出折中规划方案。最后, 对某省电网实际数据进行仿真求解, 从不同角度得出该省风电装机规划方案, 供规划工作者参考选取。通过与实际风电装机下的各项数据进行对比, 表明该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; 模糊隶属度

中图分类号: TM614

文献标识码: A

0 引 言

近年来, 随着能源问题与环境问题的日益突出, 各国陆续加大了对可再生能源的开发力度。风能作为一种可再生能源, 因其具有分布广泛、清洁无污染等特点而备受青睐^[1]。对于电力系统而言, 不同风电装机容量的接入, 一方面可以分担传统机组不同大小的负荷值, 降低燃料成本并减轻环境污染, 另一方面, 作为间歇性发电能源, 风电的接入对电力系统安全性具有不可忽略的影响。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风电场效益考虑的^[2-5]。文献[2~4]分析风电场初期建设成本与后期运行维护费, 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[5]以风电场为上层主体, 规划风电的容量, 基于投资成本与主动管理费用, 以实现最大利益化。但是, 风电出力具有不确定性、随机性、反调峰性等特点^[6], 在负荷低谷时期, 含风系统极易出现火电机组难以调节出

力以满足系统负荷的情况, 严重损害系统安全性的同时, 采取的相应弃风操作也会降低系统运行的经济性。而以上研究未考虑风电接入对火电机组启停与出力的改变, 忽略了大规模风电接入对系统安全裕度的巨大影响。而对于含风系统的安全性讨论, 目前往往是基于定量风电装机下进行研究的^[7,8], 其中文献[8]提出风电并网后系统的负调峰能力这一概念, 用于评估含风系统的安全性。同时, 由于风力发电成本较高, 形成了风电难以与传统能源抗衡的局面, 因此考虑风电社会效益对风电装机规划具有重要意义^[9,10]。

为此, 本文提出一种基于 Pareto 折中解的风电装机规划多目标优化方法, 建立以风电场经济社会效益及含风系统负调峰能力为目标的风电装机规划多目标模型, 针对某省电网数据进行建模仿真, 确定模型的 Pareto 前沿, 并基于模糊理论从不同角度得出该省风电规划的折中方案, 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。

收稿日期: 2017-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(51307144)

通信作者: 戴朝华(1973—), 男, 博士、副教授, 主要从事电力系统规划与运行优化、新能源发电等方面的研究。daichaohua@swjtu.cn

1 风电装机规划多目标模型

1.1 风电场经济社会效益建模

作为风电发电方的风电场,其成本主要为初期建设成本与后期发电的运维成本。本文对于初期建设成本以设备全寿命周期的年折旧费进行计算。风电场的收入含有来自国网企业的购电收入及国家给予的新能源发电项目补贴。

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^[11] F_1 为:

$$F_1 = \frac{F_h i_c}{1 - (1 + i_c)^{-T_w}} \quad (1)$$

式中, i_c ——银行利率; T_w ——风电机组的寿命年限, a; F_h ——风电场的初期建设费, ¥。

初期建设费的表达式为:

$$F_h = \frac{Wg}{0.78} \quad (2)$$

式中, W ——风电装机量, kW; g ——单位风电机组成本, ¥/kW; 0.78 ——风电机组设备费于风电场初期建设总成本的占比^[12]。

风电场的运维成本指的是风电场建设完成后的运行维护费用,风电场年运维成本 F_2 为:

$$F_2 = 365 W_p Q \quad (3)$$

式中, Q ——风电场平均运行维护费用, 目前已经有研究表明我国的风电场平均运行维护费用约为 0.05 ¥/kWh^[13]; W_p ——年典型日的风电出力总值, kWh。

年典型日的风电出力总值的表达式为:

$$W_p = \sum_{t=0}^{24} P_r^t W \quad (4)$$

式中, P_r^t ——年典型日第 t 时段的风电出力同时率。

对于风电场而言,其收入分为两部分,一部分为电网企业向其支付的上网电量购入费,年收入 F_3 为:

$$F_3 = 365 W_p V \quad (5)$$

式中, V ——风电上网电价, ¥/kWh。

另一部分收入来自国家政策补贴^[14], 其中,符合条件的水电机组按 600 ¥/kW 进行补贴为最主要的补贴收入。

假设所购风力机均满足补贴条件,则其年均补贴值 F_4 为:

$$F_4 = \frac{600 W}{T_w} \quad (6)$$

式中, T_w ——风电机组的寿命年限, a。

相比于传统发电能源在发电过程中对环境造成的危害,风力发电在节能与环保方面具备天然优势,存在明显的社会效益。文献[15]对风电的节能效益、减排效益、削减风害效益等社会效益进行分析与量化,得出风电的社会效益 F_{social} , 那么风电场的年社会效益 F_5 为:

$$F_5 = 365 W_p F_{\text{social}} \quad (7)$$

1.2 含风系统的负调峰能力

当大规模风电接入系统后,火电机组能够为风电上网预留空间的可调大小,是影响系统接纳风电的关键。在负荷低谷时段,若火电机组均以接近最小技术出力满足负荷需求,则此时火电机组已无充足下调出力大小来为风电接入预留空间,同时,由于风电出力具有强烈的随机性,一旦低谷时刻风电出力大于预测值,则必然导致弃风。因此在风电装机规划中考虑低谷时刻的负调峰能力,对于含风系统的安全性具有重大意义。负调峰能力表达式为:

$$\Delta H = \sum_{t \in T_L} \left[L_t - \sum_{i=1}^N I_{i,t} P_{i,\min} \right] \quad (8)$$

式中, ΔH ——系统的负调峰能力, MW; N ——火电机组数目; $I_{i,t}$ ——机组 i 在时段 t 的运行状态, 通过常规机组组合问题进行求解, 这里不再进行赘述; L_t ——时段 t 的负荷需求, MW; $P_{i,\min}$ ——机组 i 的最小技术出力, MW; T_L ——低谷时刻的时段数。

1.3 目标函数及约束条件

根据 1.1 节、1.2 节所述,风电装机规划不仅要考虑风电场的效益,同时要保证含风系统的安全性。为此,本文基于风电场的经济社会效益及含风系统的负调峰能力,建立多目标规划模型,具体为:

$$\begin{aligned} \max : F &= \sum_{i=3}^{5(4)} F_i - \sum_{i=1}^2 F_i \\ \max : \Delta H \end{aligned} \quad (9)$$

式中, F ——风电场的年效益, ¥。

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、火电机组出力上下限约束以及爬坡约束,如式(10)所

示:第 1 行为有功功率平衡约束;第 2 行为机组备用约束;第 3 行为机组出力大小约束;第 4 行、第 5 行表示机组爬坡约束;第 6 行表示风电装机约束。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N I_{i,t} P_{i,t} + W_{p,t} - L_t = 0 \\ \sum_{i=1}^N I_{i,t} P_{i,\max} + W_{p,t} \geq L_t + R_t \\ P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \\ P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_{i,\text{up}}, P_{i,t} \geq P_{i,t-1} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq P_{i,\text{down}}, P_{i,t} \leq P_{i,t-1} \\ W \leq W_m \end{cases} \quad (10)$$

式中, $P_{i,t}$ ——火电机组 i 在时刻 t 的出力值, MW; $W_{p,t}$ ——风电在时段 t 的出力值, MW, $W_{p,t} = WP_r$; R_t ——时段 t 的备用需求, MW; $P_{i,\max}$ ——机组 i 的最大出力, MW; $P_{\text{up},i}$ ——机组 i 上升功率的最大值, MW; $P_{\text{down},i}$ ——机组 i 下降功率的最小值, MW; W_m ——最大装机量, MW。

2 多目标风电装机规划模型求解算法

2.1 Pareto 前沿的获取

多目标问题的求解方法主要分为矢量化法和标量法。前者诸如多目标进化算法等, 具有较强随机性。后者包括如物理规划法、权重法等, 有较高的求解效率, 但当多目标值不在同一数量级时, 会产生 Pareto 前沿不均匀的情况。归一化法线约束法^[16]通过将目标函数的解空间归一化, 连接单目标最优点并作法线等分解空间, 将多目标问题转化为单目标求解, 获得较为均匀的 Pareto 前沿, 故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) 求取端点

目标函数 F 与 ΔH 为极大值问题, 为方便求解, 在计算过程中取其负数 F_N 和 ΔH_N , 转换为求极小值。分别求取单目标 F_N 和 ΔH_N 的最优解 $F_{F_N}(x_{F_N}, y_{F_N})$ 和 $F_{\Delta H_N}(x_{\Delta H_N}, y_{\Delta H_N})$ 。其中, x_{F_N} 、 y_{F_N} 分别表示以单目标 F_N 为最优时, 目标函数 F_N 和 ΔH_N 的对应值; 类似的, $x_{\Delta H_N}$ 、 $y_{\Delta H_N}$ 分别表示以单目标 ΔH_N 为最优时, 目标函数 F_N 和 ΔH_N 对应的数值。

2) 目标归一化

设乌托邦原点为 $F_0(x_{F_N}, y_{\Delta H_N})$, 定义 l_1 、 l_2 如

式(11)所示, 归一化计算公式如式(12)所示:

$$\begin{cases} l_1 = x_{F_N} - x_{\Delta H_N} \\ l_2 = y_{\Delta H_N} - y_{F_N} \end{cases} \quad (11)$$

$$F = \left(\frac{x - x_{\Delta H_N}}{l_1}, \frac{y - y_{F_N}}{l_2} \right) \quad (12)$$

式中, l_1 、 l_2 ——单目标最优解 F_N 与 ΔH_N 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 $F_N(x_{F_N}, y_{F_N})$ 指向 $\Delta H_N(x_{\Delta H_N}, y_{\Delta H_N})$, 如式(13)所示:

$$U = (x_{\Delta H_N} - x_{F_N}, y_{\Delta H_N} - y_{F_N}) \quad (13)$$

4) 等分乌托邦线

将乌托邦线均匀地划分为 J 个等分点, 等分点的坐标如式(14)所示:

$$X = \left[\left(1 - \frac{n}{J}\right) F_{F_N}, \frac{n}{J} F_{\Delta H_N} \right], n \in \{1, 2, \dots, J\} \quad (14)$$

5) 求 Pareto 点

以 F_N 最小为目标函数, 增加约束条件(式(15)), 更新单目标模型。

$$U(F - X) \leq 0 \quad (15)$$

归一化法线约束法求解步骤如图 1 所示, 约束条件, 式(15)的加入, 使得更新前的单目标模型的解空间变为图 2 阴影部分。对所有等分点, 求解该模型便能够得到 Pareto 前沿。

6) 确定全局 Pareto 前沿

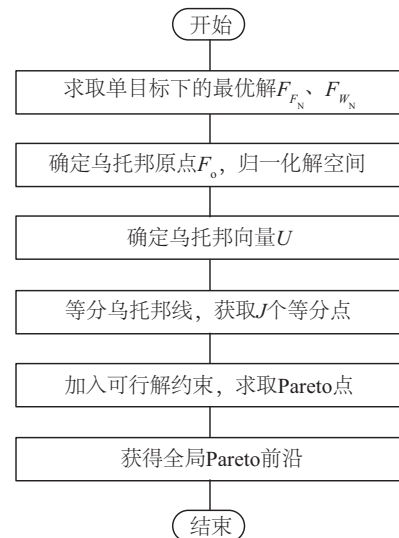


图 1 Pareto 前沿获取流程

Fig. 1 Flow chart of getting Pareto front

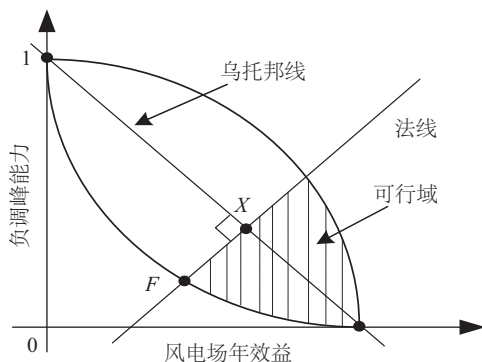


图2 归一化约束法求解示意图

Fig. 2 Sketch map of normalized normal constraint

采取文献[16]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。

2.2 折中方案的确定

为得到最终的规划方案,还需从 Pareto 前沿中选取能够权衡经济性和系统安全性的折中方案供规划者选取。目前有研究基于模糊理论求取 Pareto 前沿中的折中解^[17]。其过程为:

1) 计算模糊集

模糊集由式(16)所示的隶属函数 δ_i 确定。

$$\delta_i = \begin{cases} 0, & g_i \geq g_{i,\max} \\ \frac{g_{i,\max} - g_i}{g_{i,\max} - g_{i,\min}}, & g_{i,\min} \leq g_i \leq g_{i,\max} \\ 1, & g_i \leq g_{i,\min} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $g_{i,\max}$ 、 $g_{i,\min}$ —— Pareto 前沿中第 i 个目标的最大最小值。

2) 计算模糊隶属度

对于 Pareto 前沿中的第 j 个非支配解,其经标准化的模糊隶属度 δ_j 可由式(17)计算得出。

$$\delta_j = \frac{\sum_{i=1}^{M_g} \delta_{i,j}}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{M_g} \delta_{i,j}} \quad (17)$$

式中, J —— Pareto 前沿中非支配解的数量;
 M_g —— 目标个数,折中解则为集合 $\{\delta_j\}$ 中较大值所对应的解。

3 算例分析

以某省 2015 年实际数据进行建模仿真,其中风电装机量为 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,风电机组设备成本为 3600 元/kW。典型日数据如表 1 所示,其中负荷为不包含风火电的其他发电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

时刻	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00
L/MW	21666	20841	20428	19879	19491	19426
$P_r/\%$	0.1782	0.1781	0.1820	0.1814	0.1825	0.1839
时刻	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
L/MW	19770	22015	23172	24359	24419	24771
$P_r/\%$	0.1833	0.1839	0.1798	0.1715	0.1581	0.1500
时刻	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
L/MW	24452	24479	24911	24777	24777	24695
$P_r/\%$	0.1402	0.1345	0.1306	0.1321	0.1342	0.1395
时刻	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
L/MW	24849	24635	24387	24006	23729	23328
$P_r/\%$	0.1514	0.1610	0.1746	0.1779	0.1782	0.1795

注: L —负荷值, MW; P_r —风电出力同时率, %。

3.1 社会效益对风电装机规划的影响分析

以 Matlab 作为仿真平台,当不计风电社会效益时,采用归一化约束法得到 Pareto 前沿,如图 3 所示。采用 2.2 节模糊隶属度的计算方法,得到 Pareto 前沿中非支配解的风电装机量与模糊隶属度的关系如图 4 所示。

根据图 4 可知,当不考虑风电社会效益对风电装机进行规划时,模糊隶属度在装机量小于 3100 MW

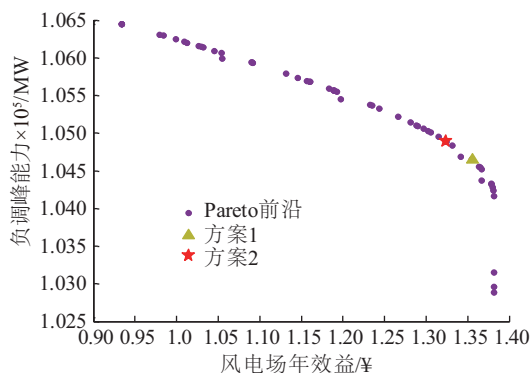


图3 Pareto前沿(不计风电社会效益)

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

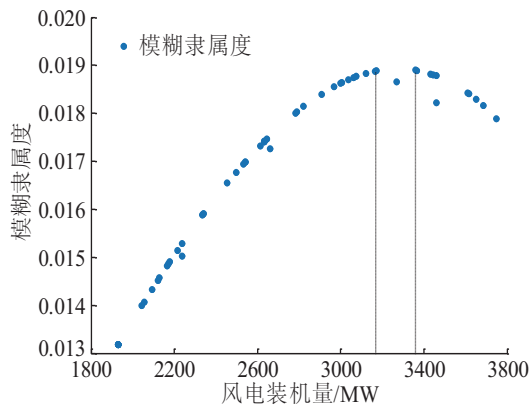


图4 非支配解隶属度(不计风电社会效益)

Fig. 4 Membership of non-dominated solutions (without wind power social benefit)

时随着装机量的提高而增大;在装机量位于 3100~3400 MW 时先减小后增大;在装机量大于 3400 MW 时呈递减趋势。根据模糊理论,选取 2 个最大隶属度所对应的规划方案作为本文折中方案,并标记于图 3 的 Pareto 前沿中,各方案具体如表 2 所示。

表2 本文折中方案(不计风电社会效益)

Table 2 Compromised plan (without wind power social benefit)

项目	方案1	方案2
风电装机量/MW	3366	3167
风电场年效益/亿¥	13.56	13.23
负调峰能力/MW	10464	10489
隶属度	0.0189	0.0189

同样,当计及风电社会效益对风电装机进行规划时,所得仿真结果如图 5、图 6、表 3 所示。

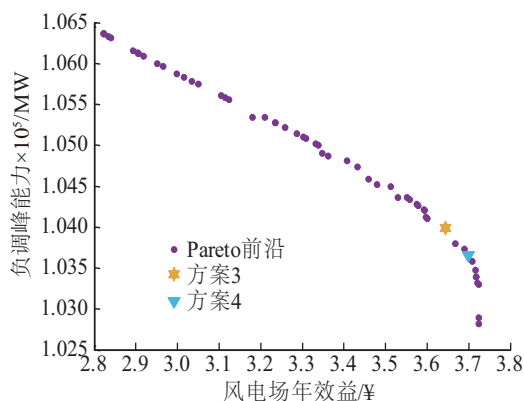


图5 Pareto 前沿(计及风电社会效益)

Fig. 5 Pareto front (considering wind power social benefit)

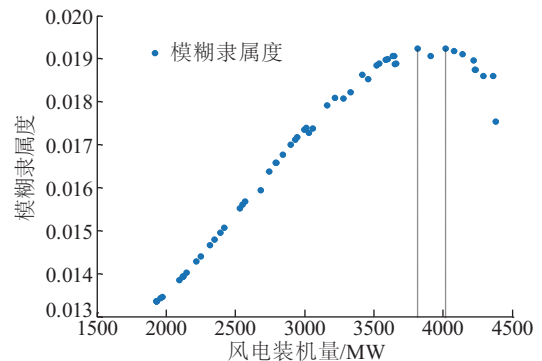


图6 非支配解隶属度(计及风电社会效益)

Fig. 6 Membership of non-dominated solutions (considering wind power social benefit)

表3 本文折中方案(计及风电社会效益)

Table 3 Compromised plan (considering wind power social benefit)

规划方案	风电装机量/MW	风电场年效益/亿¥	负调峰能力/MW	隶属度
方案3	3816	36.44	10399	0.0192
方案4	4080	37.00	10366	0.0192

由以上仿真结果可得出:

1) 对于风电场年效益与系统负调峰能力这 2 个目标, 无论是否考虑风电社会效益对风电装机进行规划, 其中一个目标的优化都将导致另一个目标一定程度的劣化。

2) 计及风电社会效益对风电装机进行规划时, 所得折中方案 3、折中方案 4 的装机量相比不计社会效益的折中方案 1、折中方案 2 有较大增幅。

3.2 负调峰能力对风电装机规划的影响性分析

首先, 若选取方案 4 作为风电装机规划方案, 则该省典型日的调峰曲线如图 7 所示。

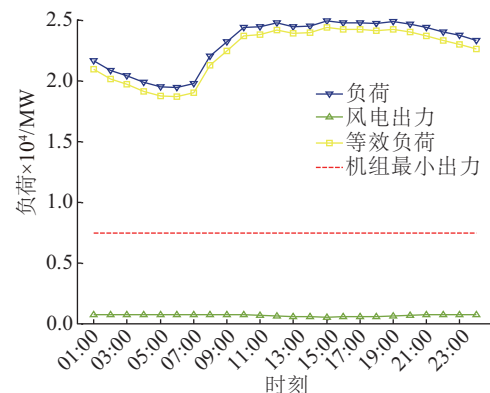


图7 系统调峰示意图(方案4)

Fig. 7 Schematic diagram of peak load regulation (plan 4)

图 7 中,虚线与正方形标记线间的空间即表征系统的负调峰能力。当该省采用方案 4 进行风电装机规划时,由图可知系统仍具有较为优秀的负调峰能力,留有充足的安全裕度应对风电出力的随机性、波动性。

若不考虑系统的负调峰能力,对风电装机进行规划,则极有可能出现系统调峰能力不足的情况,不仅严重损害系统的安全性,同时将导致弃风这一不利于节约能源、损害系统整体运行经济性的操作,如图 8 所示。由图 8 可知,在不考虑系统负调峰能力的规划方案下,该省典型日 04:00~07:00 时刻将出现系统调峰能力不足的情况,此时必须采取弃风等操作使得总发电量与负荷需求相同。

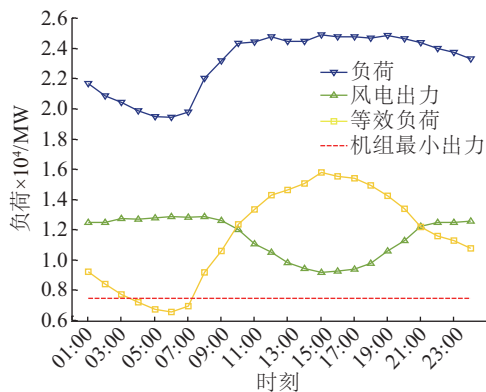


图 8 系统调峰示意图(不考虑负调峰能力的方案)
Fig. 8 Schematic diagram of peak load regulation(plan without considering peak load regulation)

3.3 折中方案与实际方案对比

不计风电社会效益时,折中方案与实际方案对比如表 4 所示。由表 4 可知,当不计风电社会效益进行风电装机规划时,本文折中方案与实际方案相比,风电装机量增加 60%以上,风电场年效益提升 40%以上,系统负调峰能力仅下降不到 2%。

表 4 折中方案与实际方案对比(不计风电社会效益)			
Table 4 Comparison of compromised plan and actual plan (without wind power social benefit)			
项目	实际方案	方案 1	方案 2
风电装机量/MW	1930	3366	3167
装机量增比/%	—	74.4	64.1
风电年效益/亿¥	9.34	13.56	13.23
风电年效益增比/%	—	45.2	41.7
负调峰能力/MW	10645	10464	10489
负调峰能力增比/%	—	-1.7	-1.5

计及风电社会效益时,折中方案与实际方案的对比如表 5 所示。

表 5 折中方案与实际方案对比(计及风电社会效益)			
Table 5 Comparison of compromised plan and actual plan (considering wind power social benefit)			
项目	实际方案	方案 3	方案 4
风电装机量/MW	1930	3816	4080
装机量增比/%	—	97.7	111.1
风电年效益/亿¥	28.23	36.44	37
风电年效益增比/%	—	29.1	31.1
负调峰能力/MW	10645	10399	10366
负调峰能力增比/%	—	-2.3	-2.6

由表 5 可知,当计及风电社会效益进行风电装机规划时,本文折中方案与实际方案相比,风电装机量增加约 100%,以系统负调峰能力仅下降约 2.5%的代价,换取了风电场约 30%增幅的经济社会综合效益。

根据表 4、表 5 可知,该省实际规划方案对于含大规模风电系统保留了充足负调峰能力,注重系统安全性而忽略了风电场效益。而本文所提风电装机规划方法,兼具安全性与经济性,在损失极少负调峰能力的条件下,极大幅度提高了风电场效益。同时,风电装机规划方案的合理选取,不仅与上述多目标问题本身有关,也与规划人员的主观意志相关。当规划人员考虑到风电所能带来的社会效益进行规划时,可从本文折中方案 3、4 中进行选择,若不考虑,则可从本文方案 1、2 中进行选择。因此,最终规划方案的选取是由多目标优化求解过程及规划人员决定的过程所完成的。

4 结 论

为引导风电有效规划,保护环境、提高风电场效益的同时,保证系统的安全性,本文研究了风电场规划运行的经济社会效益及大规模风电接入后对系统负调峰能力的影响,建立兼顾经济性与安全性的多目标模型,为规划人员提供行之有效的规划方案,具体结论如下:

1)考虑负调峰能力和风电场经济社会效益的风电装机规划属于典型的多目标优化问题,需要权衡系统的安全性与风电场的效益求得折中方案。本文结合归一化法线约束法及模糊隶属函数,从不

同规划角度,通过对某省电网数据仿真,很好地解决了该问题,在保证含大规模风电系统安全裕度的情况下尽可能大地提高了风电装机容量和风电效益,对于可再生能源的开发利用具有重要意义。

2)在风电可消纳的前提下,不考虑风电社会效益进行风电规划时,该省风电装机量可达约 3366 MW,比现有装机量提升 74.4%,带来 45.2%风电经济效益增幅的同时,仅牺牲不到 2%的系统负调峰能力。

3)在风电可消纳的前提下,计及风电社会效益进行风电规划时,该省风电装机量可达 4080 MW,比现有装机量提升 111.1%,带来 31.1%风电经济社会综合效益增幅的同时,仅付出系统约 2.6%负调峰能力削减的代价。

本文基于 Pareto 折中解的风电装机规划多目标优化方法,是建立在对风电预测误差极小的基础上进行研究的,下一步的研究将计及风电预测误差,针对风电出力的随机性解决不确定性规划问题。

[参考文献]

- [1] 朱凌志,陈 宁,韩华玲. 风电消纳关键问题及应对措施分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 29—34.
- [1] Zhu Lingzhi, Chen Ning, Han Hualing. Key problems and solutions of wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 29—34.
- [2] 王锡凡,王碧阳,王秀丽,等. 面向低碳的海上风电系统优化规划研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 4—13.
- [2] Wang Xifan, Wang Biyang, Wang Xiuli, et al. Greenhouse gas emission technique and potential reduction capacity in China's offshore wind power generation industry[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 4—13.
- [3] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [4] 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.
- [5] 孙 鹏,罗明武,孙朝霞,等. 采用改进杜鹃搜索算法的主动配电网双层分布式风电规划方法[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2743—2751.
- [5] Sun Peng, Luo Mingwu, Sun Chaoxia, et al. An improved approach based on cuckoo search algorithm for bi-level distributed wind generation planning in active distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2743—2751.
- [6] 杨 楠,王 波,刘涤尘,等. 考虑柔性负荷调峰的大规模风电随机优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 231—238.
- [6] Yang Nan, Wang Bo, Liu Dichen, et al. Large-scale wind power stochastic optimization scheduling method considering flexible load peaking [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(22): 231—238.
- [7] 王芝茗,苏安龙,鲁 顺. 基于电力平衡的辽宁电网接纳风电能力分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 86—90.
- [7] Wang Zhiming, Su Anlong, Lu Shun. Analysis on Capacity of wind power integrated into Liaoning power grid based on power balance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 86—90.
- [8] 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.
- [8] Yang Hong, Liu Jianxin, Yuan Lusha. Research of peak load regulation of conventional generators in wind power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 26—31.
- [9] 郑漳华,艾 芊,顾承红,等. 考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 23—28.
- [9] Zheng Zhanghua, Ai Qian, Gu Chenghong, et al. Multi-objective allocation of distributed generation considering environmental factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 23—28.
- [10] 付丽伟,王守相,张永武,等. 多类型分布式电源在配电网中的优化配置[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 79—84.

- [10] Fu Liwei, Wang Shouxiang, Zhang Yongwu, et al. Optimal selection and configuration of multi-type of distributed generators in distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 79—84.
- [11] 于汉启. 我国风电发展的成本与风机选型研究[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] 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.
- [12] Wang Zhengming, Lu Zhengnan. The economic analysis on investment and operation of wind power project [J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(6): 21—24.
- [13] 胡其颖. 风能利用的发展预测[J]. 可再生能源, 2005, 23(6): 75—76.
- [13] Hu Qiyang. Forecast of energy development[J]. Renewable Energy, 2005, 23(6): 75—76
- [14] 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.
- [14] Huang Bibin, Li Qionghui, Wang Qiankun. Study on national and international policy of distributed power supply[J]. Solar Energy, 2013, (14): 19—22.
- [15] 陈通谟. 试述风电社会效益的量化[J]. 内蒙古电力技术, 1998, 16(6): 55—57.
- [15] Chen Tongmo. Study on quantification of wind power social benefit[J]. Inner Mongolia Electric Power, 1998, 16(6): 55—57.
- [16] 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.
- [17] 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 BASED ON PARETO COMPROMISED SOLUTIONS

Zhao Chuan¹, Dai Chaohua¹, Zhou Tongxin¹, Yuan Shuang¹, Chen Weirong¹, Liao Guodong²

(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: A multi-objective optimization of wind power planning based on Pareto compromised solutions is presented. The model of wind power planning is proposed to lead to more economy-social benefit of wind power and ensure the security of system with wind power at the same time. This model takes consideration not only the benefit of wind farm, but also the change of peak-saving ability after insufficient consumption which is important to the security of system. Then the Pareto front is got by figuring out the non-dominated solution of this model, and the compromised solution is acquired based on fuzzy membership. Finally, this model is applied to the data of State Grid Electric Power Corporation to get the wind power installation plans. By comparing the compromised plans with the actual plan, the method is proved to be meaningful to wind power installation planning.

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