

考虑环境成本的电源规划 JASP 模型

王建学¹, 高卫恒¹, 王锡凡¹, 陈皓勇²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 华南理工大学电力学院, 510640, 广州)

摘要: 由于新能源机组投资费用高于水电、火电等常规机组,按照传统电源规划思路将限制新能源的规划发展.从发电厂的内部成本和外部成本入手讨论了电厂环境成本的评估方法,并基于环境成本对接发电厂优化的 JASP 模型进行改进,不仅计入传统的投资费用和运行费用,而且将环境成本加入了规划目标.这有利于将清洁环保的新能源纳入电源规划,同时也有利于节约不可再生能源,具有较好的环保节能效益.算例结果显示,随着环境成本的提高,规划的新能源机组容量逐步增加,建设时间也较早,政府可以通过设置合理的环境成本来调节新能源机组的建设.此项研究可为包含新能源机组的电源规划方案提供新的参考依据.

关键词: 新能源;电源规划;环境成本

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)08-1015-06

Improved JASP Model of Generation Planning with Environment Cost

WANG Jianxue¹, GAO Weiheng¹, WANG Xifan¹, CHEN Haoyong²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: For the higher investment cost of new energy unit than thermal and hydro unit, new energy unit is detained by the traditional generation planning. The internal environment cost and external environment cost is combined to analyze the environment cost of new energy, then Jiao-tong automatic system planning package(JASP) is improved on the basis of environment cost. The investment cost, operation cost and environment cost are simultaneously considered in the planning objective, which facilitates incorporating the new energy unit into the generation planning, and saving the non-renewable energy. Case studies show that high environment cost is able to increase planned capacity and accelerate the construction period of new energy unit. The government can set rational environment cost to adjust the construction process of new energy unit.

Keywords: new energy; generation planning; environment cost

在传统的水电、火电和核电资源外,很多新能源,如风能、太阳能、潮汐能、地热能、生物能等越来越受到重视.在我国《可再生能源中长期发展规划》中,计划到2020年,中国水电的装机容量将达3亿kW,其中小水电为7000万~8000万kW,并网风力发电容量达3000万kW,生物质能源发电3000万kW,太阳能发电180万kW,太阳能热水器的覆盖面积达到3亿m³,可再生能源将实现4亿~5亿

t标准煤的供应能力,占总能源供给比例将达到1/7.新能源中风力发电技术比较成熟,既可在电力覆盖不到的地区使用,又可以并入大电网运行,近年来得到迅猛发展.

在传统的电源规划中,往往以投资成本与运行成本之和最小为目标函数.随着社会的发展和研究的深入,电力规划需要考虑更多的内容,如从供电可靠性出发,需要考虑当前电源规划方案的风险成

本^[1],而电力市场改革则为电源规划引入较多的不确定因素,需要从发电商角度运用经济效益分析和博弈论等方法来研究该问题^[2].在当前节能、环保受到高度重视的背景下,电源规划更需要将新能源建设提到战略高度,然而新能源往往具有分散性和随机性,相关技术还在进一步发展中.相对于传统能源,新能源的单位投资费用较高.按照传统的投资费用和运行费用最小来规划投资方案时,新能源机组往往由于过高的投资费用而难以列入规划.为解决该问题,文献[3]考虑了环境成本,定性地讨论了其对 GESP-III 规划模型的影响.文献[4]考虑了治理排污费用,并给出一种实用快速的算法.本文在西安交通大学提出的按发电厂规划模型(JASP)基础上,考虑新能源的环保价值,从而不仅更全面地考虑新能源特性,而且能为包含新能源的电源规划提供一种参考思路.

1 计及新能源环境成本的电源规划目标函数

1.1 常规电源规划目标

通常的电源规划目标是使在规划年限 N_t 内投资成本 I 与运行成本 O 之和最小

$$\min C = I + O = \sum_{t=1}^{N_t} C_{It} + \sum_{t=1}^{N_t} C_{RF} C_{Ot} \quad (1)$$

式中: C_{It} 是 t 年投资费用; C_{Ot} 为 t 年运行费用; C_{RF} 是资金回收系数.

1.2 发电厂环境成本分析

相对水电、核电、风电等机组,常规燃煤电厂的煤炭利用效率低,污染比较严重.据统计,燃煤电厂排放的 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 和悬浮颗粒物(TSP)等污染物是我国大气污染的主要来源.另外,燃煤电厂还会产生 CO 、碳水化合物、多碳有机物以及一些放射性金属等环境污染物.电厂污染物的排放对人体健康、农作物和建筑物等都产生了不同程度的影响,造成了巨大的经济损失.目前,已有一些文献从环境经济学及系统工程的角度对电力系统环境保护的经济分析方法进行研究,如文献[3]提出了电力环境保护经济评价方法的原则、层次结构及指标体系,文献[5]定性分析了 CO_2 排放上限及提高可再生能源增长率两种不同的政策对电源规划的影响.

环境成本通常包含两部分,一部分是发电厂排污造成外部经济损失的成本,即发电的外部成本,另外一部分是发电企业减排进行设备投资及维护运行

的费用,如电除尘、脱硫、脱硝及水煤浆改造、煤炭气化、液化技术等洁净煤技术所需成本,这部分是环境的内部成本^[6].在不同的环境条件下,排放单位污染物所需的治理成本以及单位污染物造成的经济损失是不同的.一般情况下,环境容量大、功能要求低的地区,排放单位污染物的治理成本小,而环境容量小、功能要求高的地区,其单位污染物排放所需的治理成本则相对较大^[7].

综合考虑环境的外部成本和内部成本,发电厂的环境成本 P 可采用如下公式进行计算

$$P = P_{\text{out}} + P_{\text{in}} = \sum_{k=1}^K \beta_k \lambda_k E + P_{\text{in}} \quad (2)$$

式中: k 表示污染排放种类,共有 K 种; E 表示发电量; λ_k 表示在发出单位电量时排出污染物的量; β_k 表示单位污染物造成的污染损失,也可以表示为政府对污染物的重视程度,如 β_k 取得很大,表示政府对污染物非常重视,将严格控制其排放.

由于各地区经济发展水平和人口密度及污染排放的差异,测算发电厂的外部污染损失 β_k 还比较困难.综合有关部门关于大气污染损失及 SO_2 污染损失的估算, SO_2 排放造成的经济损失按 5 000 元/t 计算,2000 年电力行业 SO_2 污染造成的经济损失约 445 亿元,相当于 4.02 分/(kW·h).根据世界银行和《中国可再生能源发展项目》估算,由于各地区经济发展水平、人口密度及污染排放差异,发电污染造成的经济损失不同,2010 年发电污染损失为 1~8 分/(kW·h)不等^[7].从另外一个角度看,政府制定电厂的排污收费标准,就是鼓励各电厂积极采取措施,减少污染.2003 年 7 月国家颁布实施的《排污费征收标准管理办法》中, SO_2 和 NO_x 的收费标准均为 0.63 元/kg.

1.3 考虑环境成本的电源规划新目标

设规划年限为 N_t ,系统中待选火电厂数为 N_{gf} ,待选水电厂数为 N_{gh} .对于火电厂,用 X_{it} 表示在规划期第 t 年火电厂 i 投产的机组台数.对于水电厂,用 Y_{jt} 表示在第 t 年电厂 j 投产第 1 批机组.由于电源规划的多个工程项目的使用寿命可能不同,投产年限也不相同,在规划年末,它们将具有不同的剩余使用年限.为便于比较,使用等年值法将投资和运行费用拉平.

考虑环境成本后的电源规划目标为

$$\min C = I + O + P = \sum_{t=1}^{N_t} \left[\left(\sum_{i=1}^{N_{\text{gf}}} a_{it} X_{it} + \sum_{j=1}^{N_{\text{gh}}} b_{jt} Y_{jt} \right) + \right]$$

$$C_{RF} \left(\sum_{i=1}^{N_{gf}} c_{ti} X_{ti} + \sum_{j=1}^{N_{gh}} d_{tj} Y_{tj} + \sum_{l=1}^{N_{gfo}} e_{tl} + \sum_{k=1}^K (\beta_{k,t} \lambda_k E + P_{in,t}) \right) \quad (3)$$

式中: a_{ti} 为火电厂 i 在第 t 年投产每台机组的固定费用; b_{tj} 为水电厂 j 在第 t 年投产机组时的固定费用; c_{ti} 为火电厂 i 在第 t 年投产的机组在规划期内的年运行费现值的总和; d_{tj} 为水电厂 j 在第 t 年投产时,在规划期内年运行费用现值的总和; e_{tl} 为原有火电厂 l 在第 t 年的运行费用现值; N_{gfo} 为原有火电厂数。以上各系数的具体表达式参见文献[8]。环境成本表达式中单位污染损失 $\beta_{k,t}$ 和治理成本 $P_{in,t}$ 可能随着年度 t 不同而变化。

2 电源规划的约束条件

参照 JASP 模型,电源规划模型的约束条件包含电力平衡和可靠性约束条件^[8-9]。设投资决策变量 X, Y 为非负整数向量,各待选电厂的约束条件如下。

火电厂每年投产机组的台数 X_{ti} 应受施工及制造能力所容许投产台数 M_{ti} 的限制

$$X_{ti} \leq M_{ti} \quad t = 1, 2, \dots, N_t; \quad i = 1, 2, \dots, N_{gf} \quad (4)$$

火电厂的总装机台数不应超过给定的最终装机台数 T_{gi}

$$\sum_{t=1}^{N_t} X_{ti} \leq T_{gi} \quad i = 1, 2, \dots, N_{gf} \quad (5)$$

水电厂应满足如下互斥性约束

$$\sum_{t=1}^{N_t} Y_{tj} \leq 1 \quad j = 1, 2, \dots, N_{gh} \quad (6)$$

从整个电力系统来说,还要满足电力、电量平衡条件,电力平衡条件为

$$\sum_{\tau=1}^t \left(\sum_{i=1}^{N_{gf}} X_{\tau i} W_i + \sum_{j=1}^{N_{gh}} X_{\tau j} W_j \right) \geq C_t \quad t = 1, 2, \dots, N_t \quad (7)$$

式中: W_i 为火电厂 i 的单机容量; W_j 为水电厂 j 在枯水年的单机预想出力; C_t 为系统在第 t 年需要新建机组的总容量,由系统在第 t 年的最大负荷与容量备用之和扣除原有发电厂容量得到。

电量平衡条件为

$$\sum_{\tau=1}^t \left(\sum_{i=1}^{N_{gf}} X_{\tau i} W_i H_i^t + \sum_{j=1}^{N_{gh}} X_{\tau j} W_j H_j^t \right) \geq E_t \quad t = 1, 2, \dots, N_t \quad (8)$$

式中: H_i^t, H_j^t 分别为火电厂 i 及水电厂 j 在第 t 年的

利用时间; E_t 为系统在第 t 年需要新建发电厂补充的发电量。

这个改进的 JASP 模型可以采用启发式算法求解,该算法包括排序和爬山过程 2 个部分,这里不再赘述。有关新能源机组可靠性建模工作现在正在发展中,这里采用了较为简单的多状态模型来模拟新能源机组,而发电系统可靠性评估方法采用了等效电量函数法。

3 算例分析

3.1 算例系统数据

为了方便比较,这里采用文献[8]中的算例系统,规划期内负荷的增长情况如表 1 所示。该系统现有发电厂共 10 个,总容量为 350 万 kW,参数见表 2。从表中可以看出,当前系统是传统的火电为主的水火互济系统。

表 1 规划期内负荷增长数据

年限	年最大负荷/万 kW	年用电量/亿 kW · h
N+1	268.25	194.819
N+2	308.78	224.175
N+3	351.31	254.962
N+4	397.80	288.612
N+5	455.25	332.980
N+6	498.68	361.644
N+7	550.96	399.602
N+8	610.18	442.571
N+9	674.36	489.120
N+10	730.68	529.936

除了系统原有的电厂 8 和电厂 9 将在规划期内扩建 1 台和 2 台机组外,还将拟建发电厂 10 个,主要参数见表 3。这里的建设年限是指首批发电机组投产的最少建设年限,装机类型不仅包括了火电、水电,还包括了新能源中的风电机组,机组台数是拟建发电厂最终可能达到的规模。需要说明的是风电单机容量是指风电场分片合并后的等效容量。除以上数据外,还需水电厂枯水年及丰水年的预想出力和平均出力等数据。

3.2 优化结果

为分析方便,设在规划期内不考虑环境成本,只考虑投资和运行费用最小的方案为方案 1,环境成本为 0.05 元/(kW · h)的方案为方案 2,环境成本

为 0.10 元/(kW·h)的方案为方案 3.

不考虑环境成本的情况如表 4 所示. 从表中可以看出,新能源机组由于投资较高,风力发电场 4 规划的台数仅占可建规模的 25%,而风力发电场 9 更是没有纳入到规划中来.

从表 5 可以看出,方案 1 与方案 2 相比,风电场 4 的规划容量明显增大,由原来的 20 万 kW 增加到 80 万 kW,但风电场 9 还是没有纳入规划. 方案 3 中不仅风电场 4 规划容量增大,而且风电场 9 纳入了

规划,其计划建设年为第 4 年. 由于环境成本的引入,作为清洁能源的风电在规划中价值体现更明显,也更容易被列入建设规划. 政府可以通过对环保的重视程度和认识的深入,设定合理的环境成本,以调节新能源机组的建设.

为了分析考虑环境成本后规划容量是否符合发展需要,表 6 给出了系统装机容量逐年增长的情况,其中备用比例取为峰荷的 20%,富余容量指系统装机容量扣除峰荷容量和备用后剩余的容量.

表 2 现有电厂参数

编号	类型	单机容量 /万 kW	装机 台数	煤耗/ g·(kW·h) ⁻¹	煤价 /元·t ⁻¹	年检修 时间/月	年利用 时间/h	强迫停 运率	最小技 术出力	维修费 比例/%
1	火电	20	5	411	172.98	2	7 000	0.05	0.75	0.07
2	火电	10	2	411	172.98	2	7 000	0.05	0.75	0.07
3	火电	30	2	397	172.98	2	7 000	0.05	0.75	0.07
4	水电	5	2	0	0	1	3 600	0.03	0.20	0.02
5	水电	15	2	0	0	1	3 600	0.03	0.20	0.02
6	火电	10	2	411	220.30	2	7 000	0.05	0.75	0.07
7	水电	10	4	0	0	1	4 430	0.03	0.20	0.02
8	火电	30	1	397	172.98	2	7 000	0.05	0.75	0.07
9	火电	20	0	400	172.98	2	7 000	0.05	0.75	0.07
10	水电	20	2	0	0	1	3 400	0.03	0.20	0.02

表 3 拟建电厂参数

编 号	类 型	容量/ 万 kW	装机 台数	煤耗/g· (kW·h) ⁻¹	煤价/ 元·t ⁻¹	年检修 时间/月	年利用 时间/h	强迫停 运率	最小技 术出力	经济 寿命/a	维修费 比例/%	投资/ 万元·kW ⁻¹	建设 年限/a
1	火电	20	4	325	172.98	2	7 000	0.05	0.75	25	0.07	0.085	2
2	火电	30	4	320	172.98	2	7 000	0.05	0.75	25	0.07	0.093	2
3	火电	30	4	320	172.98	2	7 000	0.05	0.75	25	0.07	0.093	2
4	风电	20	4	0	0	1	3 600	0.05	0	25	0.02	0.700	1
5	火电	60	4	315	172.98	2	7 000	0.05	0.75	25	0.07	0.120	2
6	火电	60	4	315	220.30	2	7 000	0.05	0.75	25	0.07	0.120	2
7	水电	10	2	0	0	1	3 443	0.03	0	30	0.02	0.138	4
8	水电	10	4	0	0	1	3 885	0.03	0	30	0.02	0.154	5
9	风电	5	2	0	0	1	3 600	0.03	0	30	0.02	0.850	1
10	水电	10	3	0	0	1	3 200	0.03	0	30	0.02	0.184	4

表 4 待选发电厂优化结果(方案 1)

编号	投产年限	总装机台数	装机容量/ /万 kW	总投资/ /亿 元
1	N+4	4	80	6.80
2	N+4	4	120	11.1
3	N+8	3	90	8.32
4	N+3	1	20	14.0
5	N+8	2	120	14.4
7	N+5	2	20	2.75
8	N+5	4	40	6.16
10	N+4	3	30	5.51

为了更详细地分析规划期内的每年经济指标和可靠性指标,表 7 给出了环境成本 0.1 元/(kW·h) 时规划方案的逐年经济和可靠性指标.

从表 8 可以看出,考虑环境成本后,火电发电量有所下降,伴随水电和风电发电量逐渐增加,消耗的

标煤量也有所下降.这种考虑环保的电源规划在将清洁能源纳入规划的同时,也节约了煤这类耗竭性能源,具有较好的社会效益.

表 5 考虑环境成本后待选发电厂优化结果

编 号	方案 2				方案 3			
	投产年限	总装机台数	装机容量/ /万 kW	总投资/ /亿 元	投产年限	总装机台数	装机容量/ /万 kW	总投资/ /亿 元
1	N+4	4	80	6.80	N+7	4	80	6.80
2	N+6	4	120	11.1	N+4	4	120	11.1
3	N+8	3	90	8.32	N+8	2	60	5.55
4	N+3	4	80	56.0	N+3	4	80	56.0
5	N+10	1	60	7.20	N+9	1	60	7.20
7	N+4	2	20	2.75	N+4	2	20	2.75
8	N+5	4	40	6.16	N+5	4	40	6.16
9					N+4	2	10	3.20
10	N+4	3	30	5.51	N+4	3	30	5.51

表 6 系统装机容量逐年增长情况

年限	方案 2			方案 3		
	峰荷/万 kW	装机容量/万 kW	富余容量/万 kW	峰荷/万 kW	装机容量/万 kW	富余容量/万 kW
N+1	268.25	400	78.10	268.25	400	78.10
N+2	308.78	420	49.46	308.78	420	49.46
N+3	351.31	440	18.43	351.31	440	18.43
N+4	397.80	500	22.64	397.80	520	42.64
N+5	455.25	570	23.70	455.25	570	23.70
N+6	498.68	640	41.58	498.68	640	41.58
N+7	550.96	700	38.85	550.96	700	38.85
N+8	610.18	790	57.78	610.18	790	57.78
N+9	674.35	850	40.78	674.35	900	90.78
N+10	730.68	940	63.18	730.68	920	43.18

表 7 方案 3 规划期内逐年经济指标

年限	全年发电量/ 亿 kW·h	火电发电量/ 亿 kW·h	水电发电量/ 亿 kW·h	风电发电量/ 亿 kW·h	消耗标煤量/ 万 t	燃料费用/ 亿 元	电量不足期望值/ 亿 kW·h	失负荷概率
N+1	174.757	122.171	52.585	0	493.696	8.703	0.055 6	0.003 2
N+2	201.191	140.259	60.932	0	565.725	9.941	0.034 8	0.001 5
N+3	228.835	146.747	69.689	12.4	591.725	10.407	0.109 8	0.004 8
N+4	259.178	150.436	83.142	25.6	591.796	10.393	0.090 0	0.004 3
N+5	296.653	153.005	101.849	41.8	602.945	10.600	0.021 9	0.000 9
N+6	324.884	161.439	105.144	58.3	624.305	10.940	0.095 3	0.004 1
N+7	359.020	189.536	112.184	57.3	717.688	12.585	0.026 4	0.001 0
N+8	397.593	226.492	109.901	61.2	826.764	14.457	0.055 2	0.002 2
N+9	439.312	271.880	109.932	57.5	973.961	17.011	0.150 4	0.005 5
N+10	476.154	298.947	113.007	64.2	1 065.001	18.578	0.010 5	0.000 4

表8 3种方案的发电量与耗煤量汇总

方案	火电发电量/ 亿 kW·h	水电发电量/ 亿 kW·h	风电发电量/ 亿 kW·h	消耗标煤量/ 万 t
1	2 152.199	900.141	104.1	7 998.042
2	1 889.637	919.252	348.7	7 157.350
3	1 860.912	918.365	378.3	7 053.606

4 结束语

针对新能源投资费用较高的问题,在按发电厂优化的 JASP 模型基础上,本文方法不仅计入传统的投资费用和运行费用,而且将环境成本加入了规划目标.这有利于将清洁的新能源纳入电源规划,同时也有利于节约不可再生能源,具有较好的环保节能效益,可为包含新能源的电源规划方案提供一种新思路.

参考文献:

- [1] 李文沅. 电力系统风险评估:模型、方法和应用[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [2] 贾德香,程浩忠. 电力市场下的电源规划研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(5): 58-65.
JIA Dexiang, CHENG Haozhong. Review of generation expansion planning in market environment[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(5): 58-65.
- [3] 胡明,彭喜明. 电力系统环境保护经济评价和规划研究[J]. 中国电力, 2001, 24(10): 58-61.
HU Ming, PENG Ximing. Economical evaluation and planning study of environment protection of power system[J]. Electric Power, 2001, 24 (10): 58-61.
- [4] 李小明,陈金富,段献忠. 考虑环境保护的发电机组扩展规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(2): 35-38.
LI Xiaoming, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Generation expansion planning considering environment protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19 (2): 35-38.
- [5] PLATLS J E. Impact of regional greenhouse gas initiative and renewable portfolio standards on power system planning[C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-3.
- [6] 刘殿海,杨勇平,杨昆,等. 计及环境成本的火电机组供电成本研究[J]. 中国电力, 2005, 38(9): 24-28.
LIU Dianhai, YANG Yongping, YANG Kun, et al. Research on the production cost of coal-fired power generating unit consideration of environmental costs [J]. Electric Power, 2005, 38(9): 24-28.
- [7] 方韬,李才华,张粒子. 发电企业环境成本研究[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 16-20.
FANG Tao, LI Caihua, ZHANG Lizi. Research on the environmental cost of power plants[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 16-20.
- [8] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京:水利电力出版社, 1990.
- [9] 陈皓勇,王锡凡. 电源规划 JASP 的改进算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(11): 22-25.
CHEN Haoyong, WANG Xifan. Generation planning using Lagrangian relaxation method and probabilistic production simulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(11): 22-25.

(编辑 杜秀杰)

孙军教授的“新型智能材料研究”项目获中日政府间科技合作协定支持

我校金属材料强度国家重点实验室孙军教授与日本国立物质材料研究所任晓兵教授合作申报的“新型智能材料研究”项目获得第十二次中日政府间科技合作协定的支持.

本项目将在双方已处于国际领先水平的前期合作研究的基础上,进一步研究晶体缺陷导致形状记忆合金体系出现的一些新的奇异现象,揭示其物理机制和影响因素,并尝试研发一种新型的具有形状记忆效应及超弹性的非马氏体合金和一种高强度、高韧性的高阻尼材料,拓宽智能材料的理论研究以及实际应用领域,并就这些新现象在下一代微电子领域的应用进行一些前瞻性的探索.

(来源:西安交大科技在线 <http://www.xjtust.com>)