

基于环境和经济双重约束的电源结构优化研究

杨悦¹, 陈仕军¹, 杨博宇^{1,2}, 杨承军³

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司信息通信公司, 四川 成都 610041;
3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 电力工业对国民经济的发展起着先导和支撑作用, 是能源发展的战略中心。同时, 电力工业在中国节能减排和能源结构转型升级中担任重要角色。首先, 结合“十三五规划”对能源发展的新要求, 运用目标规划理论建立兼顾环境和经济目标的电源结构优化模型, 研究电源资源的可持续发展问题; 再以四川省电源结构资料为例进行仿真计算, 利用碳价格系数, 寻求经济与环境双重利好下的电源结构目标, 验证所建模型的合理性和可行性, 为电源结构优化问题研究提供一种新的思路和途径。

关键词: 环境最优; 经济最优; 碳排放; 碳价格系数; 电源结构; 目标规划

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)02-0024-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210205

Research on Power Supply Structure Optimization Based on Environment and Economy Constraints

Yang Yue¹, Chen Shijun¹, Yang Boyu^{1,2}, Yang Chengjun³

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Information and Communication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Electric power industry is the strategic center of energy development, which plays a leading and supporting role in the development of national economy. At the same time, the electric power industry plays an important role in energy conservation and emission reduction as well as energy structure transformation and upgrading. Based on the new requirements of the 13th Five-Year Plan for energy development, the target planning theory is used to establish a power supply structure optimization model that gives attention to the environmental and economic objectives, and the sustainable development of power resources is studied. And then, taking the data of power supply structure in Sichuan province for example, the simulation calculation is carried out, the carbon price coefficient is used to seek the target of power supply structure under the double benefits of economy and environment, and the rationality and feasibility of the proposed model are verified, which provides a new idea for the research of power supply structure optimization.

Key words: environmental optimization; economic optimization; carbon emission; carbon price coefficient; power supply structure; target planning

0 引言

中国共产党的第十八届五中全会审议通过了“十三五”规划纲要, 首次提出了“创新、协调、绿色、开放、共享”五大理念, “十三五”期间是全国电力转

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402205); 四川大学“大学生创新创业训练计划”项目(C20191106658)

变发展方式、优化电源结构与布局的重要时机。电力作为最主要的二次能源, 电力供应和安全事关国家安全战略和经济社会发展全局, 在中国能源消费和生产中占有举足轻重的地位, 其结构调整也是经济结构调整的重要组成部分。近年来, 随着中国经济发展和人民生活水平进一步提高, 用电需求快速增长。同时, 电源结构逐渐向清洁可再生能源转变, 用电需求与电源资源的时空分布不协调、区域性过

剩和发展不平衡的矛盾逐渐凸显。如何在满足国民经济发展和人民生活需要的前提下,降低用电成本,充分挖掘可再生电源资源,减少污染物排放,实现绿色电能,是当前面临的一个重要课题。

目前,国内外学者围绕电源规划模型进行了一定的探索,研究内容上主要围绕如何协调能源、环境、经济三者之间的关系。文献[1]建立了基于环境约束的电源结构优化模型。文献[2]建立了考虑系统调峰约束的水平年低碳电源规划模型,把碳排放量以碳成本的方式计入求总成本最低的目标函数。文献[3]基于目标规划理论,建立了考虑刚性需求、柔性需求的目标规划模型。文献[4]探讨了改进的遗传算法在电源规划中的应用,提出了环境友好系数的概念,建立了机组的环境效益模型,反映了发电机组在环境方面的特点。文献[5]通过微分进化算法求解电源规划模型,用改进熵权-物元可拓模型求解清洁能源的电源接入配电网对电网可靠性影响的显著指标。文献[6]介绍了目标规划理论的原理、特点、研究现状以及建模方法,建立了投资决策模型和电源规划的生产模型,并通过多阶段单纯形解法和遗传算法进行求解。

上述研究主要侧重于考虑某一方面目标的电源规划模型,鲜有综合考虑环境和经济约束的电源规划模型。下面将运用目标规划的理论,建立以经济最优和环境最优为目标函数,考虑资源约束、技术条件和政策约束等约束条件的电源结构优化模型,采用“抱团式”的规划思路^[7]求解电源结构优化问题。最后,以四川省电源结构为例,开展实例研究,并与单目标模型进行对比分析,验证所建电源结构优化模型的合理性和可行性,以期为电源规划决策和调整提供科学的依据,助力能源供给侧结构性改革。

1 电源结构优化模型

1.1 目标函数

兼顾经济 and 环境的电源结构优化模型的目标函数主要包括总发电成本最小和碳排放总量最小两个方面的目标,分别如式(1)和式(2)所示。

$$\min C = \left(\sum_{m \in \Omega_m} X_{m,0} H_m c_{m,0} + \sum_{m \in \Omega_m} X_{m,t} H_m c_{m,t} \right) / 10^4 \quad (1)$$

式中: C 为系统的总成本,亿元; Ω_m 为待规划电源类型的集合,包含火电、水电、风电、光伏发电等其他电

源; $X_{m,0}$ 为第 m 类电源的初始装机量, 10^7 W; $X_{m,t}$ 为第 m 类电源在 t 年的新增装机量,W; $c_{m,0}$ 为第 m 类电源的标杆电价,元/kWh; $c_{m,t}$ 为第 m 类电源在 t 年的边际电价,元/kWh; H_m 为第 m 类电源的利用小时,h。

$$\min E = \sum_{m \in \Omega_m} (X_{m,0} + X_{m,t}) H_m e_m / 10^4 \quad (2)$$

式中: E 为系统的总碳排放量, 10^8 g; e_m 为第 m 类电源的碳排放量,g。

1.2 约束条件

电源结构优化模型还需满足以下约束条件:

1) 电量需求约束

电量需求约束即所有电源的发电量必须满足全社会用电,包含省内电量需求和外送电量需求。其约束条件为

$$\sum_{m \in \Omega_m} (X_{m,0} + X_{m,t}) H_m / 10^4 \geq D_{in,t} + D_{ex,t} \quad (3)$$

式中: $D_{in,t}$ 为 t 年的省内需求电量; $D_{ex,t}$ 为 t 年的外送电量。

2) 可靠性约束

经济和社会对电力的需求还包括持续、可靠的供电。电力供应的安全性,主要在于一次能源资源供给的可靠程度,风电、光伏发电等可再生能源由于间歇性和不可控性,对负荷供电的可靠性较传统电源效果差。因此电力系统需要一定的备用容量以保证系统的供电可靠性和电源性能,即系统在目标年全部可用装机容量应大于或等于省内和省外的最大负荷与必要的备用容量之和。其约束条件为

$$\sum_{m \in \Omega_m} (X_{m,0} + X_{m,t}) \eta_m \geq L_{in,t}^{\max} (1+r) + L_{ex,t} \quad (4)$$

式中: η_m 为各类电源的可利用率; $L_{in,t}^{\max}$ 为 t 年的省内最大负荷需求; r 为电力备用率; $L_{ex,t}$ 为 t 年的外送需求。

3) 最大装机容量约束

对于各类电源,由于受可开发的资源量、设备生产供应能力等的限制,其扩展容量存在上限。其约束条件为

$$X_{m,t} \leq X_{m,t}^{\max} \quad \forall m \quad (5)$$

式中: $X_{m,t}^{\max}$ 为第 m 类电源在 t 年的最大扩展容量。

4) 电源结构约束

各类电源的发电装机比例应该小于目标年份该地区的非化石能源发电装机比例目标。其约束条件为

$$1 - (X_{h,0} + X_{h,t}) / \sum_{m \in \Omega_m} (X_{m,0} + X_{m,t}) \geq P_t \quad (6)$$

式中: $X_{h,0}$ 为火电的初始装机量; $X_{h,t}$ 为 t 年的火电扩展装机量; P_t 为 t 年的非化石能源装机比例。

表 1 四川省电源装机基本参数

电源类型	现有装机/ 10 ⁴ kW	利用小时/h	可利用率/%	标杆电价/ (元/kWh)	2025 年边际电价/ (元/kWh)	2030 年边际电价/ (元/kWh)	碳排放量/ (g/kWh)
水电	7564	4000	0.95	0.308 0	0.601	0.694	4.8
火电	1662	4000	1.00	0.401 2	0.591	0.591	270.0
风电	210	2200	0.15	0.570 0	0.480	0.480	33.7
光伏	135	1400	0.15	0.750 0	0.550	0.500	34.3

2 实例分析

2.1 基础数据

为了验证上述模型的合理性和可行性,以作为全国优质清洁能源基地和国家清洁能源示范省的四川省为例开展模型验证研究。四川省的电源结构以水电、风电、太阳能发电等非化石能源发电为主,同时还包含燃气机组、燃煤机组等多种类型的发电资源。四川省能源资源呈现“水多、气丰、煤少、油缺”的特点,风光资源不多,且主要集中于“三州一市”地区。为便于计算,结合四川省电源结构特点,只考虑水电、火电、风电和光伏 4 种电源类型。经资料查询和整理,参考《四川省电力需求预测研究报告》^[8]中负荷水平数据,得到四川省电源装机基本参数如表 1 所示,四川省电力需求预测情况如表 2 所示。

表 2 四川省电力需求预测情况

水平年	全社会用电/ 10 ⁸ kWh	外送规模/ 10 ⁷ kW	外送利用 小时/h	最大负荷 需求/10 ⁴ kW
2025	3500	4060	4000	6730
2030	4180	4060	4000	8030

根据《四川省“十三五”能源发展规划》^[9],到 2020 年全省非化石能源发电装机比例为 83.5%。2025 年风电和光伏的装机量分别要达到 10 GW、5 GW;2030 年分别达到 14 GW、7.5 GW。结合不同开发时序下各水平年四川水电装机规模情况,2025 年、2030 年水电装机容量上限分别为 108.39 GW、124.95 GW。火电包含燃煤机组、燃气机组、生物质机组和余热余压机组,这里以燃煤火电机组为优化对象。根据四川省的实际情况,燃煤火电机组装机容量的下限取 16 GW、上限取 20 GW,生物质、天然气和余热余压的总装机容量在 2025 年和 2030 年分别取 4.56 GW 和 5.06 GW。

将上述数据代入电源结构优化模型,所建模型为线性模型,可输入 LINGO 软件进行求解。同时,为便于分析兼顾经济和环境最优的电源结构优化模型的效果,分别将以经济最优为目标和以环境最优

为目标的电源结构优化模型的计算结果,与双重目标下的计算结果进行对比。

2.2 计算结果

由于两个目标函数都需要兼顾,两者的重要性难以准确判断,若直接选取权重系数将其转换为单目标函数的话,得到的结果受主观因素影响较大,不尽合理。为了在两组含义不同的数据中间找到平衡,考虑通过碳排放成本对碳排放总量数据进行转换,加以比较综合经济与环境指标得出较优的组合。

为实现减排目标,中国于 2017 年年底,启动了全国碳排放交易系统(emission trading scheme, ETS)。在 ETS 中,碳价格是决定减排目标能否实现的关键因素,最优碳价格是实现减排目标的最小边际减排成本。目前,中国碳价格太低,无法在地区排放交易机制中实现 2030 年的排放强度目标,因此需提高碳价格。最新的一项研究通过模拟中国 ETS 不同行业的边际减排成本曲线,计算了不同行业覆盖情景下的最优碳价格,其中电力部门承担着最大的减排任务^[10]。研究结果表明,边际减排成本随着行业参与度的增加而降低,为实现到 2030 年将碳强度从 2015 年水平降低 42%~50% 的目标,该文献提出了以下可能性:如果中国 ETS 只覆盖电力行业,碳价格至少 1140 元/t;如果覆盖 3 个行业,碳价格至少 680 元/t;如果覆盖 8 个行业,碳价格至少 345 元/t。这里以 345 元/t 为碳价格进行数据的转换比较,得到表 3 的电源结构优化结果。

按照上述基础资料,分别将经济最优和环境最优的单目标优化结果整理如表 4 所示。

2.3 结果分析

由表 3 可知,采用的规划模型不同,规划后的经济指标和环境指标有较大差别。以经济最优的优化模型中只考虑经济成本没有考虑环境效益,虽然水电的标杆电价比火电小,但其开发阶段投资成本高,边际电价高于火电,所以在只考虑经济的目标函数下火力发电占很大优势,火电的装机容量直接受到清洁能源比例和火电装机容量上限的影响。以环境

表3 兼顾经济与环境最优的电源结构优化结果

项目	2025年		2030年	
	装机容量/ 10 ⁴ kW	比例/%	装机容量/ 10 ⁴ kW	比例/%
水电	10 029	73.82	10 971	70.21
火电	2056	15.13	2506	16.04
风电	1000	7.36	1400	8.96
光伏	500	3.68	750	4.80
清洁能源 比例/%	84.87		83.96	
总用电 成本/亿元	2 036.3		2 554.5	
碳排放 总量/10 ¹⁰ kg	2.51		3.06	

表4 单目标下电源结构优化结果

项目	2025年		2030年	
	经济最优	环境最优	经济最优	环境最优
水电	9844	10 029	10 971	11 371
装机容量/ 10 ⁴ kW	火电 2241	2056	2506	2106
	风电 1000	1000	1400	1400
	光伏 500	500	750	750
清洁能源比例/%	83.50	84.87	83.96	86.52
总用电成本/亿元	2 035.6	2 036.3	2 554.5	2 571.0
碳排放总量/10 ¹⁰ kg	2.71	2.51	3.06	2.63

最优的优化模型中只考虑环境效益,因水电的碳排放量远小于火电,所以水电的装机容量上升,火电装机容量减少。此外,由不同水平年对比可知,由于水电、风电、光伏等可再生能源有较好的环境效益,能够削减发电的碳排放量,降低环境成本,进而减少总投资。

由表3、表4可知,考虑了碳排放成本后,2025年的兼顾经济最优和环境最优的电源结构优化结果与环境最优的单目标优化结果相同,这说明为了实现我国节能减排目标而设定的最优碳价格下,身负重任的电力行业将尽量以环境最优为第一优先级考虑电源结构的优化。2030年的优化结果则与经济最优的单目标优化结果相同,这表明在水电开发日益饱和,未来投资的边际成本越来越高的情况下,一味想着增加水电装机并不是最明智的选择,应该大力发展风电、光伏等清洁能源,同时也应当运用超越临界技术适量发展火电。由此可见,所建立的兼顾经济最优和环境最优的电源结构优化模型的结果更加符合四川省电源的实际情况,更加科学合理,能够更好地为四川电力行业发展方向提供科学指导。

3 结 语

上面建立了兼顾经济最优和环境最优的电源结构优化模型,并以四川省电源结构优化为例进行实例分析,以碳价格系数为桥梁进行多目标优化求解,得到了经济与环境双重利好下的电源结构优化结果。将其与经济最优和环境最优的单目标优化结果进行对比,验证了所建电源结构优化模型的合理性和可行性,该模型可为电源结构优化和电源规划提供一种科学有效的工具。

参考文献

- [1] 施应玲,刘媛媛. 基于环境约束的电源结构优化研究[J]. 中国电力,2009,42(9):16-19.
- [2] 罗金山,路畅,孟繁骏. 碳排放及燃煤约束下的电源规划及其效益评价[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):47-52.
- [3] 尚美美,董福贵. 含清洁能源的电源结构协调优化[J]. 电力科学与工程,2016,32(8):27-31.
- [4] 袁建党,袁铁江,晁勤,等. 电力市场环境下的大规模风电并网系统电源规划研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5):22-26.
- [5] 刘姣. 含清洁能源的多种电源结构协调优化问题的研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
- [6] 魏本宁. 基于目标规划理论的电源规划方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2004.
- [7] 田鑫,孙彦龙,牛新生,等. 促进负荷中心实现低碳发展的送电模式[J]. 电网技术,2015,39(3):663-668.
- [8] 国网四川省电力公司经济技术研究院. 四川省电力需求预测研究报告[R]. 2018.
- [9] 四川省发展和改革委员会,四川省能源局. 四川省“十三五”能源发展规划[R]. 2016.
- [10] Tang B J, Ji C J, Hu Y J, et al. Optimal Carbon Allowance Price in China's Carbon Emission Trading System: Perspective from the Multi-sectoral Marginal Abatement Cost [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253:119945.

作者简介:

杨悦(1998),女,本科,研究方向为水文与水资源工程;
陈仕军(1989),男,博士,助理研究员,研究方向为水电能源系统优化配置等;

杨博宇(1990),男,博士,工程师,研究方向为水电运行管理及电力市场;

杨承军(1964),男,高级统计师,研究方向为电网投资与计划管理。

(收稿日期:2020-07-23)