

考虑碳排放约束的跨国电源优化规划方法

孟婧¹, 梁才浩^{1*}, 宋福龙¹, 陈晨¹, 苏盛²

(1. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031;

2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410114)

Multi-state Generation Optimization Planning Method Considering Low-carbon Constraints

MENG Jing¹, LIANG Caihao^{1*}, SONG Fulong¹, CHEN Chen¹, SU Sheng²

(1. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China;

2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha 410114, Hunan Province, China)

Abstract: Sharing electricity and energy is the key path for realizing low-carbon sustainable development for the whole world in the future. In the paper a multi-state generation planning method for multiple types of generating resources with consideration of low-carbon constraint is proposed. According to the future low-carbon goal and energy related policies generation systems for multi-states are built based on national energy resources and feasible generation mix using optimization model. Then the power system with certain generation mix is simulated by a production cost simulation model with CO₂ emission model integrated and performance indices of the planned system based on the simulation results is calculated. Optimization parameters of generation planning model is tuned. After “simulation and optimization” process based on the combination of planning and operation optimal generation plan with minimizing total cost is realized. In the case study generation planning for multiple types of generating resources is performed for three countries in South America for the planning year of 2035.

Keywords: global energy interconnection; low carbon; generation planning optimization; production simulation

摘要: 能源电力的充分共享是实现区域乃至世界范围内低碳可持续发展的关键途径。结合清洁低碳电源规划要求, 提出一套考虑碳排放约束的跨国电源优化规划方法。根据各国

未来能源电力宏观发展需求及碳排放目标, 建立了跨国电源最优规划模型以及生产模拟仿真模型相结合的电源规划方法。跨国电源最优规划模型根据碳排放等宏观约束求解新建电源结构, 应用考虑碳排放成本的生产模拟仿真模型针对求解电源结构进行模拟, 统计分析化石能源机组的碳排放量指标, 分析仿真指标与宏观发展目标的参数偏差, 矫正跨国电源规划最优模型参数, 再次求解电源规划方案。通过“生产模拟—优化规划”的迭代过程, 将规划与运行有机结合, 实现以满足碳排放约束且成本最小为优化目标的电源规划方案。采用所提出的方法, 对南美洲3个主要国家2035年实现大规模联网后的发电系统进行了电源优化规划。

关键词: 全球能源互联网; 低碳; 电源优化; 生产模拟

0 引言

大力发展清洁能源是解决当前化石能源短缺和环境污染问题、实现“碳达峰、碳中和”目标的必然选择, 已成为全球共识^[1]。发电侧碳减排是各国实现减排目标的主要途径, 也是能源转型发展的重要目标之一^[2-3]。在能源开发方面实施清洁替代, 并依托全球能源互联网实现清洁能源的充分共享, 可有效减少全球碳排放^[4-5]。建立清洁低碳的电源结构是清洁能源电力充分共享的重要基础。

基于全球能源互联网骨干网架^[6], 未来电源规划需要考虑一些新的影响因素和要求, 主要表现在: ①规划的前提是各国间实现清洁电力充分共享, 电源结构的低碳、可持续成为重要的电源规划原则; ②统筹考虑以多个国家为整体的规划对象, 即电源规划结果既

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U196620027); 全球能源互联网集团有限公司科技项目 (52450018000L)。

National Natural Science Foundation of China (U196620027);
Science and Technology Foundation of Global Energy Interconnection
Group Co., Ltd. (52450018000L).

要满足各国能源电力发展目标,又要满足多国所在区域的整体发展需要;③约束设置需要充分考虑各国能源资源的禀赋特点及差异性优势。

目前,国内外相关学者对考虑碳排放约束的电源规划已经展开了一定的研究。文献[7]提出了面向多个区域的长期电源和燃气系统的联合规划方法。文献[8]以经济成本最小、综合能效最大为目标构建了碳交易下电源规划优化模型。文献[9-10]考虑风电、光伏出力的间歇性、波动性,以发电运行成本、 CO_2 处理成本最小为电源规划目标函数,建立了考虑碳减排效益的电源规划模型。文献[11-12]提出应用基于区域比较的碳排放权分配机制,求解低碳电源规划问题。上述文献将碳排放约束引入电源规划模型,但优化模型多以经济最优为目标重新设计电源结构,未能在模型求解中充分考虑调度运行的相关约束,难以评价新建电源方案叠加现有系统的运行情况。文献[13]建立了投资成本最小的高比例可再生能源电源规划模型,同时利用生产模拟仿真进行求解,但该方法以固定系统的电源结构作为研究对象,尚未考虑面向全球能源互联网的跨国电源规划研究需求。

基于上述分析,本文建立了考虑碳排放约束的跨国电源优化规划模型,并将其与生产模拟模型相结合,进行迭代优化,实现满足碳排放目标且经济最优的跨国电源规划方案求解。

1 考虑碳排放约束的跨国电源规划框架

考虑碳排放约束的跨国电源规划目的是解决未来大规模可再生能源并网、高参数大功率发电机组普及且成本大幅降低的情况下,利用各国清洁能源资源形成优势互补,构建低碳经济的电力生产环境。

考虑碳排放约束的跨国电源优化规划框架如图1所示。首先,应用考虑碳排放约束的跨国电源最优规划模型,以每个国家不同类型新增电源的装机规模为求解目标,求解电源规划方案,约束条件包括各国能源电力发展需求、资源储量及开发政策限制、碳排放及可再生能源消纳目标等;其次,应用考虑碳排放成本的生产模拟模型进行全年8760 h仿真,优化调整跨国电源最优规划模型参数,迭代求解电源规划方案,最终形成满足碳排放目标及成本最小的跨国电源规划方案。生产模拟仿真模型中综合考虑多类型电源的发电特性及经济特性,并在化石燃料机组中构建了碳排放模型。

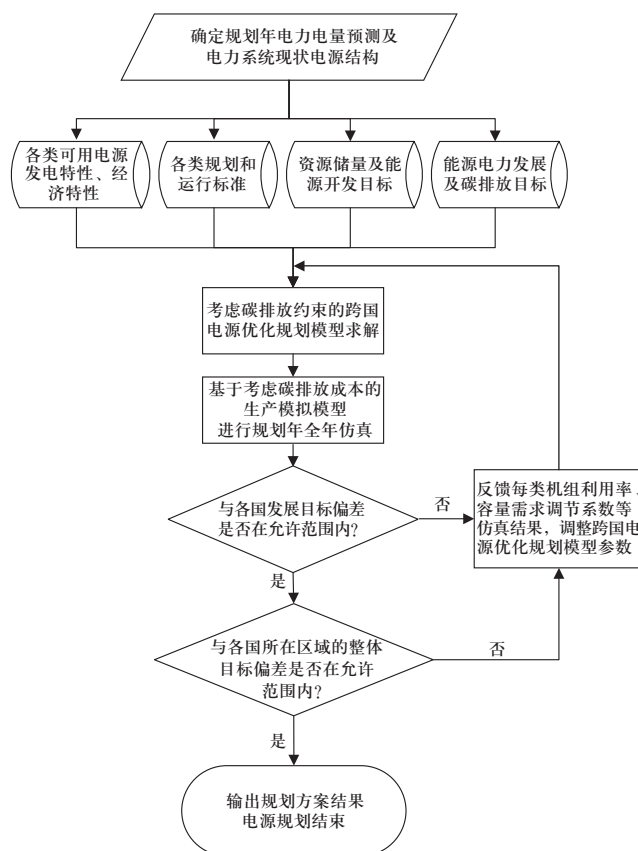


图1 电源优化规划框架

Fig. 1 Framework of generation optimization planning

该规划框架利用跨国电源最优规划模型求解电源结构和装机规模,并利用生产模拟仿真模型分析系统各项运行指标。生产模拟计算结果与规划目标的偏差将通过矫正参数的方式反馈到下一轮的跨国电源最优规划模型中,进而修正电源规划结果。通过跨国电源最优规划模型的求解和生产模拟计算的迭代,将规划与运行整合,使电源规划方案满足系统各项运行要求,实现综合成本最小。

2 考虑碳排放约束的跨国电源最优规划模型

考虑碳排放约束的跨国电源最优规划模型以多国所在区域整体电源建设和发电运行总成本最小为目标,满足各类电源装机出力、电量、可靠性、碳排放等约束。应用线性规划方法求解各个国家各类电源的最优装机。模型中,带有上横线的参数来自生产模拟仿真的计算结果。求解变量为每个区域各类电源的新增装机量。

目标函数:

min

$$\sum_{r=1}^R \left\{ \begin{aligned} & \sum_{i_{TH}=1}^{N_{THr}} (I_{C_{i_{TH}r}} \times c_{i_{TH}r}) + \sum_{i_{TH}=1}^{N_{THr}} (C_{o_{i_{TH}r}} \times \bar{H}_{i_{TH}r} \times c_{i_{TH}r}) + \\ & \sum_{i_{RE}=1}^{N_{REr}} (I_{C_{i_{RE}r}} \times c_{i_{RE}r}) + \sum_{i_{RE}=1}^{N_{REr}} (C_{o_{i_{RE}r}} \times \bar{H}_{i_{RE}r} \times c_{i_{RE}r}) + \\ & \sum_{i_{HY}=1}^{N_{HYr}} (I_{C_{i_{HY}r}} \times c_{i_{HY}r}) + \sum_{i_{HY}=1}^{N_{HYr}} (C_{o_{i_{HY}r}} \times \bar{H}_{i_{HY}r} \times c_{i_{HY}r}) + \\ & \sum_{i_E=1}^{N_{Er}} (I_{C_{i_Er}} \times c_{i_Er}) + \sum_{i_E=1}^{N_{Er}} (C_{o_{i_Er}} \times \bar{H}_{i_Er} \times c_{i_Er}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: I_C 表示年化单位投资成本, 美元/MW; 下标 r 为国家标识, R 表示规划国家总数; c 为新增装机, MW, 是求解变量; C_o 为运行成本, 美元/MWh; $\bar{H}$ 为仿真计算出的某类电源平均发电小时数, h; i_{TH} 表示第 i 类非水常规电源; i_{HY} 表示第 i 类水电电源; i_{RE} 表示第 i 类非水可再生能源电源; i_E 表示第 i 类储能电源; N_{THr} 表示第 r 个国家非水常规电源类型数; N_{HYr} 表示第 r 个国家水电电源类型数, 按照流域特性的不同进行划分; N_{REr} 表示第 r 个国家非水可再生能源电源类型数; N_{Er} 表示第 r 个国家储能电源类型数。

优化模型中构造的约束条件, 既要满足各个国家自身的约束, 又要满足多国所在区域的整体要求, 当国家标识 r 等于 $R+1$ 时, 代表多国所在的整体区域。优化模型中考虑如下约束条件:

$$C_{i_{TH}r \min} \leq c_{i_{TH}r} \leq C_{i_{TH}r \max} \quad (2)$$

$$C_{i_{HY}r \min} \leq c_{i_{HY}r} \leq C_{i_{HY}r \max} \quad (3)$$

$$C_{i_{RE}r \min} \leq c_{i_{RE}r} \leq C_{i_{RE}r \max} \quad (4)$$

$$C_{i_Er \min} \leq c_{i_Er} \leq C_{i_Er \max} \quad (5)$$

式(2)至(5)分别表示非水常规电源、水电电源、非水可再生能源及储能的最大新增装机约束及最小新增装机约束。其中, $C_{\max}$ 为最大装机容量, MW, 受各国各类能源资源的可开发量限制^[14-17]; $C_{\min}$ 表示最小装机容量, MW, 由各国能源开发目标确定。

$$\begin{aligned} & \sum_{i_{TH}=1}^{N_{THr}} (\bar{H}_{i_{TH}r} \times c_{i_{TH}r}) + \sum_{i_{HY}=1}^{N_{HYr}} (\bar{H}_{i_{HY}r} \times c_{i_{HY}r}) + \\ & \sum_{i_{RE}=1}^{N_{REr}} (\bar{H}_{i_{RE}r} \times c_{i_{RE}r}) \geq E_{Ar} - E_{Er} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)表示电量约束。式中: E_{Ar} 表示国家 r 规划年度用电量预测值, MWh; E_{Er} 表示现状电网已投运的电源机组年度发电量预期总和, MWh。

式(7)、式(8)分别为高峰时段和低谷时段新增装机总容量的约束, 即总新增有效装机大于等于考虑系统裕度要求下的装机缺额。非水常规机组及储能认定为全部容量均有效; 水电装机有效容量由电站预想出力确定; 非水可再生能源由于具有间歇性、不确定性, 对负荷高峰、低谷时段的容量贡献存在差异, 因此需要分别构建高峰和低谷时段的装机容量约束, 风电、光伏等非水可再生能源需经过等效折算^[18-19]后, 累计计入系统有效装机。

$$\begin{aligned} & \sum_{i_{TH}=1}^{N_{THr}} c_{i_{TH}r} + \sum_{i_{HY}=1}^{N_{HYr}} (R_{i_{HY}r} c_{i_{HY}r}) + \sum_{i_E=1}^{N_{Er}} c_{i_Er} + \\ & \sum_{i_{RE}=1}^{N_{REr}} (\bar{L}_{i_{RE}r} c_{i_{RE}r}) \geq [P_{Ar}(1 + M_{cr}) - C_{Erp}] \bar{R}_p \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i_{TH}=1}^{N_{THr}} c_{i_{TH}r} + \sum_{i_{HY}=1}^{N_{HYr}} (R_{i_{HY}r} c_{i_{HY}r}) + \sum_{i_E=1}^{N_{Er}} c_{i_Er} + \\ & \sum_{i_{RE}=1}^{N_{REr}} (\bar{L}_{i_{RE}r} c_{i_{RE}r}) \geq [P_{Ar} F_v (1 + M_{cr}) - C_{ErV}] \bar{R}_v \end{aligned} \quad (8)$$

式中: R_{HY} 为预想出力系数, 取值为0到1, 由水电站水文条件确定; $\bar{L}$ 为有效带载能力, 取值为0到1, 表示相同可靠性前提下, 间歇性电源可替代常规机组的能力^[20]; P_{Ar} 表示国家 r 规划年负荷峰值, MW; M_c 为容量裕度, %; C_{Er} 表示现状电网已投运的电源机组有效装机量总和, MW; F_v 为谷段调节系数; $\bar{R}_p$ 和 $\bar{R}_v$ 为容量需求的调节系数, 分别表示负荷高峰时段和负荷低谷时段系统缺供电力最大值与最大负荷之比, 该调节系数由生产模拟仿真结果得出。

式(9)表示可再生能源的消纳目标约束, 即规划系统的可再生能源新增消纳电量大于或等于国家可再生能源消纳量的目标与现有可再生能源消纳电量的偏差。

$$\sum_{i_{RE}=1}^{N_{REr}} (\bar{H}_{i_{RE}r} c_{i_{RE}r}) \geq E_{RET} - E_{REEr} \quad (9)$$

式中: E_{RET} 为国家 r 的可再生能源消纳电量目标, MWh; E_{REEr} 为国家 r 已有可再生能源装机的可消纳电量, MWh。

式(10)表示碳排放目标约束, 即系统碳排放总量小于等于各个国家的碳排放控制目标之和。该约束中, 仅考虑化石能源机组的排放情况。

$$\sum_{i_{TH}=1}^{N_{THr}} (\bar{H}_{i_{TH}r} c_{i_{TH}r} R_{EMi_{TH}r}) \leq E_{MER} - E_{MTr} \quad (10)$$

式中: E_{MTr} 为国家 r 的碳排放控制目标, t; E_{MER} 为国

家 r 已有电源装机的碳排放量, t ; R_{EMr} 为机组排放率, t/MWh 。

3 考虑碳排放成本的生产模拟仿真模型

生产模拟用来仿真分析电力系统的运行过程, 可以在输电约束和运行约束的限制下, 使发电成本最小。本文生产模拟仿真模型是对规划年全年进行逐小时仿真, 需根据各国资源特性, 构建规划年水电、风电、光伏等可再生能源的理论出力曲线, 并根据负荷需求、电网结构等约束, 开展考虑碳排放成本的机组组合和经济调度。仿真完成后, 统计分析包括碳排放总量在内的各项指标。生产模拟仿真模型如图2所示。

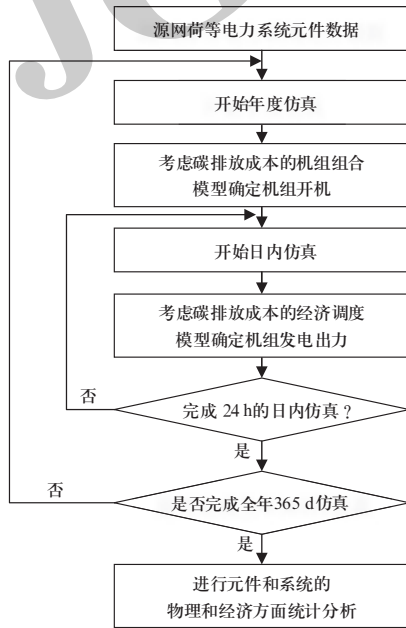


图2 时序生产模拟仿真流程

Fig. 2 Process of production cost simulation

3.1 考虑碳排放成本的机组组合模型

机组组合的优化目标是系统发电成本最小, 包括发电机组的启动成本、运行成本以及碳排放成本等, 即

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T \{C_i[p_i(t)] \times I_i(t) + S_i \times I_i(t) \times [1 - I_i(t-1)]\} \quad (11)$$

式中: 目标函数为系统总发电成本; $p_i(t)$ 和 $I_i(t)$ 为决策变量, $p_i(t)$ 为机组 i 在 t 时段实际出力, $I_i(t)=1$ 表示机组处于运行状态, $I_i(t)=0$ 表示机组处于停机状态; $C_i[p_i(t)]$ 为机组 i 在 t 时段的发电运行成本; $S_i(t)$ 为机组 i 在 t 时段的启动成本; M 为机组数; T 为总时段数。

$C_i[p_i(t)]$ 用二次函数表示为

$$C_i[p_i(t)] = a_i[p_i(t)]^2 + b_i[p_i(t)] + c_i + p_i(t) \times R_{EMi} \times T_r \quad (12)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 的发电成本特性函数参数, 其中 c_i 为空载成本, 在机组组合模型中可将二次函数进行线性化以便于求解; R_{EMi} 为机组排放率, t/MWh ; T_r 为 r 区域碳排放价格, 美元/ t 。

机组组合模型的约束条件如下。

1) 系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^M p_i(t) = P_d(t) \quad (t=1, 2, \dots, T) \quad (13)$$

式中: $P_d(t)$ 为 t 时段系统的总负荷。

2) 发电机最大和最小出力约束。

$$I_i(t) \times P_{i\min} \leq p_i(t) \leq I_i(t) \times P_{i\max} \quad (14)$$

式中: $P_{i\min}$ 、 $P_{i\max}$ 分别为机组 i 的最小、最大出力。

3) 机组旋转备用容量约束。

$$\sum_{i=1}^M P_{i\max} \geq P_d(t) + S_D(t) \quad (t=1, 2, \dots, T) \quad (15)$$

式中: $S_D(t)$ 为 t 时段系统总的备用容量需求。

4) 爬坡率限制约束。

$$-D_{Ri} \leq p_i(t) - p_i(t-1) \leq U_{Ri} \quad (16)$$

式中: U_{Ri} 、 D_{Ri} 分别为机组 i 每个时段允许的上、下调出力。

5) 机组最小运行与停机持续时间约束。

最小开机时间约束:

$$[T_i^{\text{on}}(t-1) - T_{i,\min}^{\text{on}}][I_i(t-1) - I_i(t)] \geq 0 \quad (17)$$

最小停机时间约束:

$$[T_i^{\text{off}}(t-1) - T_{i,\min}^{\text{off}}][I_i(t) - I_i(t-1)] \geq 0 \quad (18)$$

式中: $T_{i,\min}^{\text{on}}$ 、 $T_{i,\min}^{\text{off}}$ 分别为机组 i 的最小启、停时间; $T_i^{\text{on}}(t-1)$ 、 $T_i^{\text{off}}(t-1)$ 分别为机组 i 在 t 时段前的持续开、关机时间。

3.2 考虑碳排放成本的经济调度模型

经济调度在机组组合确定的机组启停计划基础上, 以电力系统运行方案经济最优为目标, 根据实时负荷预测, 在经济调度周期内, 决定每台开机机组的输出功率, 满足源荷有功平衡、机组运行特性和电网安全等约束。

目标函数为

$$\min F = \sum_{i=1}^{N_G} C_i(p_i) + \sum_{h=1}^{N_{RE}} C_h(p_h) \quad (19)$$

式中: N_G 为系统常规机组数; p_i 和 p_h 分别为常规机组 i 和可再生能源机组 h 的有功功率; $C_i(p_i)$ 和 $C_h(p_h)$ 分别为机组 i 和 h 的运行成本, 常规机组成本模型包含碳排放成本。

经济调度约束条件如下。

1) 系统负荷平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_G} p_i + \sum_{h=1}^{N_{RE}} p_h = \sum_{k=1}^{N_{LD}} D_k \quad (20)$$

式中: D_k 为母线负荷; N_{LD} 为负荷母线的个数。

2) 机组出力上下限约束。

$$p_{i\min} \leq p_i \leq p_{i\max} \quad (21)$$

式中: $p_{i\max}$ 、 $p_{i\min}$ 分别为发电机组 i 发电功率的上、下限。

3) 机组加减负荷速度约束。

$$-\Delta p_i \leq p_i(t) - p_i(t-1) \leq \Delta p_i \quad (22)$$

式中: Δp_i 为机组 i 每时段可加减负荷的最大值。

4) 可再生能源发电约束。

$$0 \leq p_h \leq P_h \quad (23)$$

式中: P_h 为机组 h 的可再生能源机组理论出力。

4 算例分析

本文采用南美洲3个主要国家作为电源规划的研究对象, 选取2035年为目标规划年, 2015年为系统现状年。

4.1 基础数据

根据EIA (Energy Information Administration) 数据统计, 南美A、B、C三国2015年度最大负荷分别24 030 MW、85 710 MW和9920 MW。现状电力系统装机情况如表1所示。

表 1 现状电力系统电源结构

Table 1 Generation mix for existing power system

类别	三国总体	A国	B国	C国
总装机/MW	215 380	38 190	155 550	21 640
燃气/%	17	51	7	24
燃煤、燃油/%	20	15	18	37
水电/%	50	24	59	30
风电/%	5	1	6	4
光伏/%	0.3	0	0	3
核电/%	2	4	1	0
其他/%	7	5	9	2

基于生产模拟仿真结果, 2015年系统无缺供电量, CO₂排放总量为8200万t。主要发电类型电源的发电小时数如表2所示。

表 2 现状电力系统各类机组发电小时数

Table 2 Generation hours for existing power system

类别	h			
	三国总体	A国	B国	C国
燃气	852	1020	626	689
燃煤、燃油	1789	1913	830	4900
水电	5000	5258	4993	5043
风电	2056	2927	1869	2102
光伏	2393	0	0	2292
核电	7784	7454	8069	0

4.2 约束假设

针对2035年, 设定低碳、可再生能源以及供电可靠性等指标: ①2035年3个国家CO₂排放总量不超过2015年排放量2倍的水平, 即总排放量不超过16 400万t, 燃煤、燃油碳排放率为0.85 t/MWh, 燃气碳排放率为0.42 t/MWh^[21]; ②鼓励非水可再生能源开发, 风电和光伏发电的消纳总电量至少达到年度需供电量的10%; ③2035年3个国家总需电量为1676 TWh, 总负荷为256 587 MW, 年度缺供电量不超过年度需供电量的0.1%; ④根据相关气象组织提供的10~30 a风速、太阳辐照数据以及各流域多年水文特性^[22]分别计算出风电、光伏及水电新增装机的出力特性^[23-26]; ⑤根据各国电力调度中心和电力交易所的相关数据, 3国负荷高峰和低谷时段分别为当地时间下午3点和凌晨4点, 光伏电源在负荷高峰和低谷时段的有效带载能力分别为20%和0^[27], 风电在负荷高峰和低谷时段的有效带载能力分别为20%和30%; ⑥根据RGGI、EIA、IEA及BP等机构发布的信息, 化石机组的碳排放成本约为0.004 4美元/kWh, 约占其变动成本的10%。2035年电源投资成本、变动成本及使用年限如表3所示。

表 3 各类机组发电参数

Table 3 Parameters of each type of generator

类别	投资成本 /(美元·kW ⁻¹)	变动成本 /(美元·(kWh) ⁻¹)	运行年限/a
水电	3500	0.005	40
风电	1143	0.007	20
光伏	1000	0.004	20

续表

类别	投资成本 /(美元·kW ⁻¹)	变动成本 /(美元·(kWh) ⁻¹)	运行年限/a
燃气	714	0.029	30
燃煤、 燃油	571	0.043	30
核电	5500	0.014	40

4.3 结果分析

考虑碳排放约束的情景下，根据跨国电源规划流程，进行电源优化、生产模拟、矫正参数、电源再优化和仿真的循环计算，在进行3次迭代后，完成电源优化过程，如表4所示。优化过程首先应用2015年各类电源的平均发电小时数作为电源优化模型的初始参数。第一次电源优化方案仿真后，CO₂排放量和风光消纳电量均达到目标要求，但缺供电量为0.32%，超过了缺供电量0.1%的供电可靠性要求。在第二次电源优化中，根据前次仿真获得的各类机组的发电小时数以及可靠性约束进行参数调整。第二次电源优化的仿真结果依然显示缺供电量超标，需要继续矫正优化参数。第三次电源优化方案中，风电新增141 000 MW、光伏新增222 790 MW，水电新增1615 MW，能够满足CO₂排放、风光消纳电量占比以及缺供电量的要求，电源规划过程结束。

新增电源以风电、光伏和水电为主，主要原因是：①煤油气机组为碳排放的主要来源，碳排放约束严格限制了这类电源的新建规模及发电量；②可再生能源中，风光机组单位投资成本相对较低，且由于资源禀赋好，发电小时数高，风光机组综合成本低于水电机组，成为主要新增装机类型。

表 4 优化过程分析

Table 4 Analysis of optimization process

类别	考虑碳排放约束		
	第一次 电源优化	第二次 电源优化	第三次 电源优化
水电新增/MW	717	1010	1615
风电新增/MW	72 604	110 103	141 000
光伏新增/MW	301 257	263 992	222 790
燃煤、燃油新增/MW	0	0	0
燃气新增/MW	0	0	0
核电新增/MW	0	0	0
CO ₂ 排放量/万t	14 600	12 600	10 000
风光消纳电量/TWh	1148	1075	860
缺供电量/%	0.32	0.13	0.02

优化后，南美A、B、C三国的电源结构由2015年以水电、化石能源机组为主，调整为2035年的以风电光伏为主、常规电源为辅，如表5所示。经过生产模拟仿真校验，该电源结构可以满足A、B、C三国碳排放量、新能源消纳以及供电可靠性等多重目标。

表 5 2035年考虑碳排放约束的规划电源结构

Table 5 Planned generation mix by 2035 with carbon emission constraints

类别	三国总体	A国	B国	C国
总装机/MW	580 785	191 930	247 780	141 075
燃气/%	6	10	4	4
燃煤、燃油/%	7	3	12	6
水电/%	19	5	37	5
风电/%	26	53	20	1
光伏/%	38	28	20	85
核电/%	2	1	1	0
其他/%	3	0	6	0

4.4 关键约束影响分析

若不考虑碳排放约束，规划结果新增电源以光伏和燃气机组为主，主要原因是：①在常规机组中，燃气机组综合成本低于燃煤机组，且燃气机组有效装机容量贡献率与新能源相比，是风电、光伏装机的3~4倍，燃气与风光机组间变动成本的差距大幅缩小，使得燃气有效综合成本最低；②优化方案中，风光消纳电量占比是优化求解的约束条件之一，即风光电量至少占年度供电电量的10%，因此需要新增风光装机。考虑到光伏机组投资成本和运行成本均低于风电机组，因此电源优化规划模型以优先选择新增光伏机组为主。

相比考虑碳排放约束情景的结果，不考虑碳排放约束情景下的CO₂排放总量大幅提升，达到43 000万t，但新建电源装机量降低了57%，成本降低了66%，如表6所示。

除碳排放约束外，是否考虑跨国共享也将直接影响电源规划结果。假设各国电源规划以实现电源跨国共享为前提：①在三国总排放量16 400万t目标不变的基础上，将排放指标按照现状系统中的化石能源机组发电量的比例分配给每个国家；②每个国家的新能源消纳总电量至少达到该国年度需供电量的10%；③每个国家年度缺供电量不超过该国年度需供电量的0.1%。

表 6 碳排放约束影响分析
Table 6 Impact analysis of CO₂ emission constraint

类别	不考虑碳排放约束		考虑碳排放约束	
	新增 装机/MW	利用 小时数/h	新增 装机/MW	利用 小时数/h
水电	0	4908	1615	4853
风电	0	2930	141 000	2889
光伏	67 062	2008	222 790	2026
燃煤、燃油	0	5894	0	3404
燃气	90 147	5600	0	1334
核电	0	8060	0	7016
CO ₂ 排放量/万t	43 000		10 000	
风光消纳电量 /TWh	167		860	
缺供电量/%	0		0.02	

对比跨国电源规划与各国独立进行电源规划的算例结果, 如表7所示。在考虑碳排放约束的情况下, 各国独立规划和跨国电源规划方案中的新增电源结构相似, 均以风电、光伏和水电为主, 但独立电源规划的新建电源总装机比跨国电源规划的新建装机总量增加47%, 总成本高56%, 主要原因是独立规划时, 各国无法发挥跨国电源间的互补互济作用, A、B、C每个国家的新增清洁能源装机只能够对本国碳排放和供电目标做出贡献, 无法为三国整体和其他国家实现碳排放及供电目标提供帮助。

表 7 跨国电源规划与各国独立电源规划
Table 7 Comparison between multi-states generation planning and independent state generation planning

类别	跨国电源规划	各国独立电源规划		
		MW		
		A国	B国	C国
水电新增	1615	0	11 442	0
风电新增	141 000	47 266	203 332	35 200
光伏新增	222 790	16 482	207 117	17 600
燃煤、燃油新增	0	0	0	0
燃气新增	0	0	0	0
核电新增	0	0	0	0

根据表8的汇总结果, 通过分析碳排放约束和跨国共享对规划结果的影响可知, 为满足清洁低碳的用电需求, 电源规划中需要考虑碳排放约束, 但也会因

此提升新增装机量, 增加相应成本, 引入跨国共享后, 则可以减少装机需求总量。因此同时考虑碳排放约束和跨国共享的电源优化规划, 可以达到清洁低碳、相对经济的电力供应目标。

表 8 各场景电源规划汇总
Table 8 Summary of generation planning for different scenarios

类别	跨国电源规划		各国独立电源规划	
	考虑碳排 放约束	不考虑碳 排放约束	考虑碳排 放约束	不考虑碳 排放约束
水电新增/MW	1615	0	11 442	0
风电新增/MW	141 000	0	285 798	23 963
光伏新增/MW	222 790	67 062	241 199	168 777
燃煤、燃油新增/MW	0	0	0	0
燃气新增/MW	0	90 147	0	68 628
核电新增/MW	0	0	0	0
总新增装机规模/MW	365 405	157 209	538 438	261 368
总新增电源投资成本 /百万美元	389 606	131 427	607 911	245 167
CO ₂ 排放量/万t	10 000	43 000	11 823	32 244

5 结论

本文提出了考虑碳排放约束的跨国电源优化规划方法, 该方法将跨国电源最优规划模型和考虑碳排放成本的生产模拟仿真模型相结合, 通过迭代寻优, 获得在实际运行方式下能够满足低碳、经济的电力供应目标的规划方案。

应用该方法, 本文对南美三国电源结构进行了优化分析, 通过对比分析碳排放约束、跨国共享对电源规划结果的影响可知, 考虑碳排放约束后新建电源装机总量及成本会有所提升, 但通过跨国共享, 可有效降低装机总量及成本, 实现多国整体电力消纳的低碳、经济目标。优化后的南美A、B、C三国电源结构以风光为主、常规电源为辅, 可以满足三国碳排放量、新能源消纳以及供电可靠性等多重目标。算例分析体现出本文提出的优化规划方法在跨国多类型电源规划研究与工程实践中的实用性。

在现有优化规划方法的基础上, 下一阶段的规划研究将进一步拓展方法的应用范围, 以电网充分互联和电源清洁替代作为整体规划目标, 实现满足区域低碳约束的网源协同最优规划。

参考文献

- [1] 李瑜, 孙东磊, 王明强, 等. 火电机组灵活性改造与输电网规划多阶段联合决策方法[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(4): 344-352.
LI Yu, SUN Donglei, WANG Mingqiang, et al. Multi-stage joint planning decision-making for transmission network and thermal power unit flexibility reformation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 344-352(in Chinese).
- [2] MA Z Y, ZHANG S N, HOU F X, et al. Exploring the driving factors and their mitigation potential in global energy-related CO₂ emission[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 413-422.
- [3] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 1-11.
CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 1-11(in Chinese).
- [4] 侯方心, 张士宁, 赵子健, 等. 实现《巴黎协定》目标下的全球能源互联网情景展望分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 34-43.
HOU Fangxin, ZHANG Shining, ZHAO Zijian, et al. Global energy interconnection scenario outlook and analysis in the context of achieving the Paris agreement goals[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 34-43(in Chinese).
- [5] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [6] 李隽, 宋福龙, 余潇潇. 全球能源互联网骨干网架规划研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(5): 527-536.
LI Jun, SONG Fulong, YU Xiaoxiao. Research on global energy interconnection backbone grid planning[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 527-536(in Chinese).
- [7] UNSIHUAY-VILA C, MARANGON-LIMA J W, DE SOUZA A C Z, et al. A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1154-1168.
- [8] DEGHAN S, AMJADY N, KAZEMI A. Two-stage robust generation expansion planning: a mixed integer linear programming model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 584-597.
- [9] 段建民, 王志新, 王承民, 等. 考虑碳减排效益的可再生能源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 11-15.
DUAN Jianmin, WANG Zhixin, WANG Chengmin, et al. Renewable power planning considering carbon emission reduction benefits[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 11-15(in Chinese).
- [10] 董晓宁, 杨国华, 王岳, 等. 基于碳交易的含风光发电的电力系统低碳经济调度[J]. 电气技术, 2019, 20(3): 67-71.
DONG Xiaoning, YANG Guohua, WANG Yue, et al. Low-carbon economic dispatch of power system with wind power generation based on carbon trading[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(3): 67-71(in Chinese).
- [11] 宋旭东, 向铁元, 熊虎, 等. 考虑碳排放权分配的低碳电源规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 47-52.
SONG Xudong, XIANG Tieyuan, XIONG Hu, et al. Low carbon generation expansion planning based on carbon emission right allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 47-52(in Chinese).
- [12] 李渝, 叶琪, 檀勤良, 等. 考虑碳交易的电源结构多目标优化模型研究[J]. 现代电力, 2019, 36(4): 11-16.
LI Yu, YE Qi, TAN Qinliang, et al. Research on multi-objective optimization model of power structure considering carbon emissions trading[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(4): 11-16(in Chinese).
- [13] 徐唐海, 鲁宗相, 乔颖, 等. 源荷储多类型灵活性资源协调的高比例可再生能源电源规划[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 27-34.
XU Tanghai, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. High penetration of renewable energy power planning considering coordination of source-load-storage multi-type flexible resources[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 27-34(in Chinese).
- [14] World Wind Energy Association. World wind resource assessment report [R/OL]. (2014-12) [2020-07]. http://www.wwindea.org/download/technology/WWEA_WWRAR_Dec2014_2.pdf.
- [15] International Renewable Energy Agency. Analysis of infrastructure for renewable power in Southern Africa [R/OL]. (2014) [2020-11]. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Africa_CEC_infrastructure_2015.pdf.
- [16] International Hydro Power Association. Hydropower status report 2017 [R/OL]. (2017) [2020-11]. <https://www.andritz.com/resource/blob/259434/61e24a6ce4964fe17a4daf21d67fe321/iha-status-report-2017-data.pdf>.
- [17] Christian Santana. Energías renovables en Chile [M]. Santiago:Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional, 2014.
- [18] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 考虑风速变化特性的风电容量可信度评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 18-27.
LIANG Shuang, HU Xuehao, ZHANG Dongxia, et al. Capacity credit evaluation of wind generation considering wind speed variation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 18-27(in Chinese).
- [19] World Bank. Operating and planning electricity grids with variable renewable generation review of emerging lessons from selected operational experiences and desktop studies[R]. Washington D.C.: World Bank, 2013.
- [20] 郭创新, 张理, 张金江, 等. 风光互补综合发电系统可靠

性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 102-108.

GUO Chuangxin, ZHANG Li, ZHANG Jinjiang, et al. Reliability analysis of wind and photovoltaic integrated generating system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 102-108(in Chinese).

- [21] Energy Information Administration. How much carbon dioxide is produced per kilo-watt-hour of US electricity generation[EB/OL]. (2021-11-04) [2021-12-11]. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>.
- [22] Basin Data Explorer[DB/OL]. <http://grdc.sr.unh.edu/html/Stn.html>.
- [23] Energy Information Administration. International energy statistics 2015[DB/OL]. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>.
- [24] Michael C.Brower. 风能资源评估: 风电项目开发实用导则[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [25] 特雷佛 M.莱彻. 新能源手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [26] 黄强. 水能利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [27] MIKETA A, UECKERDT F. Planning for the renewable future long-term modelling and tools to expand variable renewable power in emerging economies[R/OL]. (2017-01) [2021-12-11]. <https://www.irena.org/publications/2017/Jan/Planning-for-the-renewable-future-Long-term-modelling-and-tools-to-expand-variable-renewable-power>.

收稿日期: 2021-12-15; 修回日期: 2022-02-05。



孟婧

作者简介:

孟婧(1983), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、清洁能源综合利用等, E-mail: meng-jing@geidco.org。

梁才浩(1978), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统优化潮流、电网规划、新能源接入等。通信作者, E-mail: caihao-liang@geidco.org。

宋福龙(1979), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、电力系统经济性等, E-mail: songfulong@geidco.org。

陈晨(1990), 男, 工程师, 研究方向为电网规划、清洁能源综合利用等, E-mail: c-chen@geidco.org。

苏盛(1975), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统网络安全防护和大数据技术应用, E-mail: eessheng@163.com。

(责任编辑 张宇)