

碳中和目标下福建省电源结构的优化

方朝雄¹, 胡臻达¹, 陈晗施^{2,3}, 张林垚¹, 涂夏哲¹, 刘宇鹏^{2,4}, 陈伟强^{2,3*}

1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福州 350012

2. 中国科学院城市环境研究所环境与健康重点实验室, 厦门 361021

3. 厦门市城市代谢重点实验室, 厦门 361021

4. 厦门市城市环境智慧管理重点实验室, 厦门 361021

摘要 电力清洁化是中国实现“双碳”目标的关键,其核心是电源结构如何优化重构。通过建立多目标优化模型,对比了2060年福建省在3种“最优”情景下的电力能源结构及其特点。结果表明:(1)福建省当前电源结构呈现火电占主导、水电占比逐步降低、核电占比升高、风光能初具规模、生物质能仍待发展的特征;(2)未来若全省形成以清洁能源为主、碳排放较低的能源结构,需将电力装机容量提升至25500万kW,并大幅增加清洁能源和储能设备的部署力度;(3)若以电源结构丰富、配置均衡为目标,需将电力装机容量提升至18000万kW,推动电源结构向多样化发展;(4)若形成以可控能源为主导、稳定性较好的能源结构,则需将装机容量提升至20550万kW,但碳捕获、利用与封存技术(CCUS)部署力度大、费用高。研究发现,CCUS普及率达到82%并每年获得超过2620万t的自然碳汇“配额”是全省构建以清洁能源为主的电源结构并实现电力行业碳中和的关键阈值。

关键词 碳中和;电源结构;优化模型;情景分析

电力行业作为碳排放“大户”,贡献了全国碳排放总量的近半数^[1],其排放主要来自煤炭、天然气等化石能源使用,因此如何改变并调整优化当前国内电源仍以化石能源为主、清洁能源为辅的特征结构势在必行^[2]。

电源结构的调整优化首先需要开展能源系统建模,通过建模目标设定、建模方法选择、建模标准及建模结构确定等步骤予以完成。在建模目标的设定上,能源系统模型常使用经济目标来确定未来的优化方案,目前较常用的经济目标包括年金化成

收稿日期:2022-06-28;修回日期:2023-02-27

基金项目:国网福建省电力有限公司经济技术研究院咨询项目(B3130N21000W);国家自然科学基金项目(42271298);福建省引导性项目(2021Y0068);福建省对外合作项目(2021H0042);中国科学院青年创新促进会资助项目(2022307);中国科学院城市环境研究所“揭榜挂帅”项目(IUE-JBGS-202201)

作者简介:方朝雄,教授级高级工程师,研究方向为电网规划及调度运行,电子信箱:fang_chaoxiong@fj.sgcc.com.cn;陈伟强(通信作者),研究员,研究方向为资源与环境管理、资源安全与可持续发展战略,电子信箱:wqchen@iue.ac.cn

引用格式:方朝雄, 胡臻达, 陈晗施, 等. 碳中和目标下福建省电源结构的优化[J]. 科技导报, 2023, 41(22): 67-76; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.22.009

本、年系统成本、投资回收期、年净利润和能源平准化成本等;在建模方法的选择上,能源系统模型主要采用优化法、预测法和回测法,其中优化法可模拟模型中所有可能的情景方案并对其进行优先排序,是目前能源系统模型中较为常用的方法;在建模标准的确定上,能源系统模型可组合针对经济和能源效率、环境、技术以及社会等方面的评价标准,并根据建模目标来综合决定未来的优化方案;在建模结构的建构上,能源系统模型需要定义模型的地理边界、时空间粒度、行业类型、技术应用等要素,来实现对其系统自身的全面描述^[3]。解玉磊等^[4]以区域发电成本最小为目标、碳排放量为约束标准建立区域电力结构优化模型,结果表明逐月调整碳排放额度可有效降低总发电成本。吕涛等^[5]以总发电成本最小为目标,以环境容量、技术扩散、供需平衡等为约束标准构建电源结构优化模型,结果表明应加快推动风光发电技术的开发和规模化生产。李渝等^[6]以经济成本最小、综合能效最大为目标,以电力电量平衡、电源开发容量以及碳排放为约束标准构建电源结构多目标优化模型,结果表明在电源结构优化配置中纳入碳交易市场机制有助于实现电源结构低碳高效运行。余碧莹等^[7]以系统总成本最小为目标,以技术渗透速度、碳预算、能源服务需求以及能源和材料的可用性为约束标准设计线性规划模型,结果表明中国电力、钢铁、化工、交通等行业2060年能源消耗排放的二氧化碳量仍需要生态碳汇作抵消。综上所述,当前大多数研究以总发电成本最小、综合能效最大为目标,以未来用电需求、污染物排放标准、未来电源开发容量等为约束标准进行电源结构优化建模。相关评价方法仍可从以下角度予以完善:(1)深入行业尺度的碳减排责任和份额研究;(2)探索碳中和目标下的电源结构综合优化配置方案;(3)思考生态和人工碳汇对未来电源结构转变的作用。

为此,在当前“双碳”背景下,以促进区域(福建省)电力行业碳中和为环境目标、以总平准化度电成本最小为经济目标,以满足用电需求同时保障供电稳定为社会目标,构建电源结构优化模型,进一步融合福建省的中长期规划,评估未来不同碳汇能

力变化情景下电力行业的装机容量、电源结构、发电量以及总平准化度电成本变化,提出相应的转型建议。

1 研究区与数据

本研究以福建省为例,开展多情景下的电源结构转型评估。福建省位于中国东南部沿海,全省总面积约为12.4万 km^2 ,森林覆盖率为66.8%、森林蓄积量为7.29亿 m^3 、碳汇能力约为0.36亿 t/a ^[8]。2020年全省电源结构以火电为主(54.74%),其次是核电(24.10%)、水电(17.16%)、风电(3.39%)、光伏(0.62%)^[9]。以上背景说明福建省是一个森林覆盖条件较好、碳汇能力相对较优、电源碳排放强度较大的省份,如何实现省内碳中和远景下电源结构的重构对中国其他省份具有较好的指导意义和较高的参考价值。

研究涉及福建省电源结构及电源结构优化模型相关参数2类数据。2000—2019年各电源总量及其占比数据来自《中国能源统计年鉴》。电源结构优化模型相关参数包括目标函数参数(包括各电源类型的年有效运行时间和平准化度电成本等)、碳汇评估参数(包括气候变化下陆地生态系统碳汇变化量、森林管理面积、优势树种林分量和生物量、气象参数及各电源类型的碳排放系数等)、社会用电需求预测参数(包括第一产业占比、第二产业占比、第三产业占比、人口、城市化率、气温及人均国内生产总值),以及能源潜力约束参数(气电、火电、生物质发电、核电、水电、风电、光伏的最大可开发潜力)。其中目标函数所需参数来自相关文献(详见研究方法),碳汇评估参数数据来自《福建省重要生态保护和修复重大工程实施方案(2021—2035年)》和中国第九次全国森林资源清查资料等文献和报告,社会用电需求预测参数来自2001—2020年《福建省统计年鉴》,电源开发潜力来自《全省清洁能源运行调度实施方案(试行)》《2020—2021年度全国电力供需形势分析预测报告》《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干建议》《福建省陆上风电建设规划(2012年修编)》《国家能源局关

于福建省海上风电规划的复函》《2020—2026年中国智慧电力行业市场经营风险及发展战略咨询报告》《2017—2023年中国核电行业市场分析预测及发展趋势研究报告》等有关文献和政府企业报告。

2 研究方法

2.1 研究路线

首先确定所涉及的电源类型,进而构建电源结构优化模型,最后评估2060年福建省不同最优情景下的装机容量、电源结构、发电量及平准化度电成本(图1)。在电源类型上,研究选择全省目前已经应用或未来具备发展潜力的电源类型,包括火电、水电、核电、风电、光伏及储能。其中,火电细分

为煤电、煤电+碳捕获、利用与封存技术(carbon capture, utilization and storage, CCUS)、天然气发电以及生物质等发电;储能为抽蓄和电化学等日调节型储能,储氢及氢能发电等季节调节型储能。在模型构建上,研究通过设定模型的目标函数(平准化度电成本最小化)、决策变数(各电源类型的装机容量)及约束条件(碳中和约束、电力需求约束、能源最大可开发潜力约束及电力系统电力电量平衡约束),实现对未来电源结构的预测;在情景设置上,研究充分考虑不同优化目标下电力行业发电结构配置的可能性,依次设定“碳排放最优情景”“均衡性最优情景”“稳定性最优情景”,探讨未来福建省电源结构变化。

2.2 电源结构优化模型

电源结构优化模型主要包括:目标函数(未来电源结构总平准化度电成本最小)、决策变数(未来电源结构的装机容量)及约束标准(满足未来社会电力需求、实现碳中和目标、不超过能源最大可开发潜力以及满足电力电量平衡)。

1) 目标函数。平准化度电成本最优。各电源类型全生命周期内成本和发电量进行平准化后所得到的发电成本的组合最小,模拟未来此情景下的电源结构(表1),计算公式为

$$\min C_T = \sum_{i=1}^n \frac{C_{i,t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_{i,t}}{(1+r)^t}} T_i C_i \times 10^{-4} \quad (1)$$

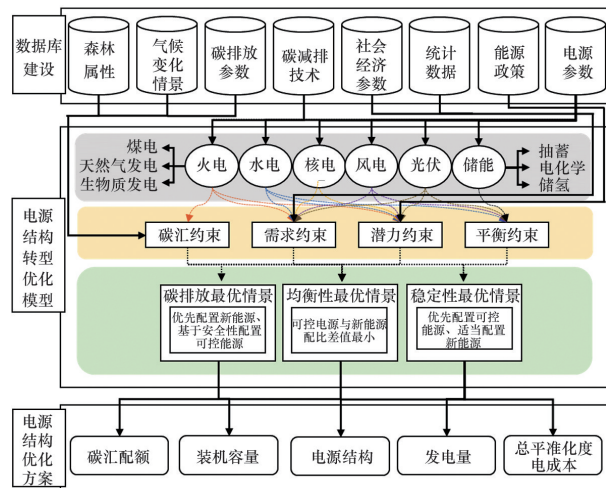


图1 电源结构优化模型的研究技术路线

表1 各电源类型的年有效运行时间、平准化度电成本以及碳排放系数

能源类别	子类别	$T/h^{[10]}$	平准化度电成本/(元·(kW·h) ⁻¹) ^[11-15]	碳排放系数/(元·(kW·h) ⁻¹) ^[16-17]
火电	煤电	1500	0.26	0.87
	煤电+CCUS	4000	0.81	0.08
	气电	1700	0.73	0.41
	生物质发电	5800	0.45	0.05
水电	—	3200	0.26	0.02
核电	—	7800	0.33	0.02
风电	—	3600	0.50	0.05
光伏	—	950	0.57	0.05
日内调节型储能	抽蓄	2000	0.67	0.05
	电化学	2000	1.15	0.05
季节调节型储能	储氢	2000	1.50	0.05

式中： C_T 为电源结构在全生命周期的总平准化度电成本，元； $C_{i,t}$ 为电源类型*i*的建设成本，元； $C_{A,i,t}$ 为电源类型*i*在第*t*年的年度成本，元； $E_{i,t}$ 为电源类型*i*在第*t*年的发电量，kW·h； T_i 为电源类型*i*的年有效运行时间，小时； C_i 为电源类型*i*的装机容量，万kW； n 为各电源类型编号； N 为各电源类型的生命周期； r 为折现率。

2) 决策变量。电源类型*i*的装机容量。电源类型包括火电中的煤电(C1)、煤电+CCUS(C2)、气电(C3)、生物质发电(C4)、水电(C5)、核电(C6)、风电(C7)、光伏(C8)、日内调节型储能中的抽蓄(C9)、电化学(C10)及季节调节型储能中的储氢(C11)共11类。

3) 约束标准。约束标准1——碳中和约束。各电源类型发电所产生的二氧化碳排放总量不超过福建省未来碳汇能力的一定比例，计算公式为

$$\sum_{i=1}^3 T_i C_i C_{Fi} \times 10^{-4} \leq S_{Cj} \quad (2)$$

式中， C_{Fi} 为电源类型*i*单位发电量二氧化碳排放量，kg/(kW·h)； S_{Cj} 为未来*j*种碳汇情景下电力行业的碳汇份额(考虑电力行业历史碳排放比例占全省总碳排放量的40%，故暂按省内总碳汇量的40%考虑其未来碳汇比例)^[9]。

设定各电源类型单位发电量CO₂排放量如表1所示，并假设未来各电源类型单位发电量二氧化碳排放量水平与当前水平保持一致。目前市场中火电转型方案包括将煤电转型为整体煤气化联合循环发电系统(IGCC)等类型的清洁低碳机组、(超)超临界和超临界+CCUS^[16]。考虑未来火电仍可能大比例存在的现实需求，选择单位发电量二氧化碳排放量较小的C2(火电中的煤电引入CCUS技术)

作为未来火电转型方案，有助于整合煤气化和燃机系统公用设施，利用火电厂现有热力送出条件，在实现火电厂发单位电力的碳排量的同时减少工程投资^[18]。

综合考虑自然和人工2种碳汇途径对福建省未来电源结构的影响。在自然碳汇方面，气候变化对未来生态碳汇能力的影响参考Yu等^[19]通过伦德-波茨坦-耶拿动态全球植被模型(Lund-Potsdam-Jena dynamic global vegetation model, LPJ-DGVM)，模型模拟1950—2060年多个温室气体浓度情景下福建省陆地生态系统碳汇能力的变化，并取温室气体浓度情景(representative concentration pathway, RCP)4.5 W/m²条件下的碳汇能力变化情况(即总辐射强迫在2100后稳定在4.5 W/m²，大气中CO₂浓度增加至538×10⁻⁶)。人为森林管理对未来生态碳汇能力的影响参考《福建省重要生态保护和修复重大工程实施方案(2021—2035年)》和中国第九次全国森林资源清查资料，并采用碳计量模型(CO₂FIX V3.2.0)模拟2020—2060年多个森林管理情景下福建省森林生态系统碳汇变化(即除气候变化影响外、由森林管理所带来的森林生态系统碳汇变化)^[20-22]，考虑针对宜林地(58.45万hm²)进行中固碳优势树种种植、对达成熟期的用材林优势树种进行轮伐管理^[23-24]。模型所需森林结构、生物量模块参数如表2^[24]、表3^[25-26]所示，其中用材林优势树种不同林龄下自然死亡率、采伐情景参考文献[26]，各树种连年平均生长量则分别参考自相关文献(杉木^[27-28]、马尾松^[29-30]、桉树^[31-32])。在人工碳汇方面，考虑对火电中的煤电引入一定比例的IGCC和CCUS技术。

表2 福建省树种结构(单位: 100 hm²)

树种	林分				用材林优势树种			
	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林
杉木	3514	4206	1420	4427	3346	3845	1180	3380
马尾松	723	2358	1946	1826	626	1517	1297	864
桉树	792	432	216	648	792	432	216	648
针叶混	676	1685	1659	1899	602	1037	1275	1010
阔叶混	3536	9766	2984	3224	696	554	73	120
针阔混	1274	3800	1490	2146	744	1540	673	1014

表3 福建省用材林优势树种 CO₂FIX 生物量模块使用参数

树种	碳含量 ^[25] /%	木材干质量密度 ^[26] (Mg/m ³)	年更新率 ^[26]			生长期 ^[26]	轮伐期 ^[26] /a
			叶	枝	根		
杉木	51.27	0.307	0.33	0.05	0.10	3—11月	25
马尾松	52.71	0.431	0.33	0.05	0.10	3—11月	30
桉树	49.01	0.578	0.33	0.05	0.10	3—11月	35

约束标准2——“电力需求约束”:即各电源类型的发电总量需满足2060年社会用电需求,计算公式为

$$\sum_{i=1}^8 T_i C_i \times 10^{-4} \geq D_t \quad (3)$$

$$D_t = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_7 X_7 + \varepsilon \quad (4)$$

式中,TD_t为福建省第t年的用电需求,亿kW·h;β₀~β₇为多重线性模型的回归系数;其中X₁~X₇分别是第一产业占比、第二产业占比、第三产业占比、人口、城市化率、气温及人均GDP^[33-34];ε为残差,符合正态分布。

选取2000—2019年影响社会用电需求的7项变量(表4^[35]),在SPSS软件中构建模型。为保证线性回归方程和回归系数的显著性,采用向后逐步

表4 影响未来社会用电需求的7项变量历史值

年份	X ₁ /%	X ₂ /%	X ₃ /%	X ₄ /万人	X ₅ /%	X ₆ /°C	X ₇ /10 ⁴ 亿元
2000	16.4	43.1	40.5	3410	41.99	18.7	0.38
2001	15.3	44.1	40.6	3445	42.76	19.1	0.41
2002	14.8	45.4	39.8	3476	45.66	19.0	0.45
2003	13.6	46.6	39.8	3502	46.37	19.6	0.50
2004	13.4	47.9	38.7	3529	47.63	19.7	0.57
2005	12.4	48.3	39.4	3557	49.42	19.7	0.64
2006	11.1	48.6	40.3	3585	50.40	20.0	0.75
2007	10.2	48.5	41.3	3612	51.38	20.1	0.93
2008	10.0	49.3	40.7	3639	53.01	19.7	1.09
2009	8.9	49.4	41.7	3666	55.07	20.0	1.24
2010	8.5	51.4	40.2	3693	57.11	19.6	1.50
2011	8.3	52.0	39.7	3720	58.09	19.4	1.79
2012	8.1	52.1	39.8	3748	59.61	19.5	2.02
2013	7.8	52.5	39.8	3774	60.76	19.9	2.25
2014	7.4	52.8	39.8	3806	61.80	20.0	2.49
2015	7.2	51.2	41.6	3839	62.59	20.1	2.68
2016	7.2	49.6	43.2	3874	63.60	20.3	2.96
2017	6.5	48.1	45.3	3911	64.79	20.4	3.38
2018	6.1	48.7	45.2	3941	65.80	20.3	3.87
2019	6.1	48.6	45.3	3973	66.50	20.4	4.24

法,先将自变量全部引入模型进行统计显著性检验,再逐步剔除冗余自变量,寻找最少自变量组成的最佳模型。

约束标准3——“能源最大可开发潜力约束”:即未来各能源类型i可提供的装机容量应不低于2019年的装机容量水平且应不超过2060年该能源类型的装机容量上限值,计算公式为

$$C_{i,2019} \leq C_3 \sim C_8 \leq C_{i,2060} \quad (5)$$

式中,C_{i,2019}为电源类型i在2019年的装机容量,万kW;C₂~C₇分别代表火电中气电、生物质发电、水电、核能、风能以及光伏的装机容量,万kW;C_{i,2060}为电源类型i在2060年的最大装机容量,万kW。

设定2060年各能源类型的发电潜力上限值如下:火电中的天然气发电按照站址资源规模,未来装机容量约为700万kW;火电中的生物质发电2010年、2015年、2020年发电总量分别为6.98亿、19.39亿、30.40亿kW·h,2060年发电总量预计可达118.48亿kW·h,装机容量约215万kW^[36];由于省内水电资源已基本开发完毕,未来预计装机容量将保持在2019年的水平(约1200万kW);远期核能发电装机容量预计为现有规模的4倍,预期可达到3600万kW^[37];福建省未来海上风电资源开发容量预计可达7000万kW以上;福建省太阳能发电每年可发电1600(kW·h)/m²,倘若未来开发省内适宜发电的建成区屋顶面积(70 m²)的50%,预计每年可发电560亿kW·h,装机容量约为5090万kW^[38]。

约束标准4——“电力电量平衡约束”:安排储能来补充未来水电、风电、光伏由于发电错峰导致的不参与电力出力的装机容量。风电的“可靠容量”约占总容量的30%(F_w)。光伏发电在冬春季节和用电高峰时段存在“错峰”,其在未来全国大范围内并网互补、推广双向主动追光组件的情况下实时匹配率约为12%(F_s)。本研究中储能设备装机容量

量规划仅覆盖新能源供电稳定性所需额外增加的总发电量(为储能放电时发出的电量),而考虑储能充放电过程存在损耗,储电所需电量通常大于发电量,此处储电量另计。计算公式为

$$C_8 + C_9 + C_{10} \geq C_6 \times (1 - F_w) + C_7 \times (1 - F_s) \quad (6)$$

式中, $C_6 \sim C_{10}$ 分别为风电、光电、日内调节型储能中抽蓄、电化学以及季节调节型储能中储氢的装机容量,万kW; F_w 、 F_s 分别为水电装机、风电装机、光电装机的参与电力平衡系数。

2.3 情景分析

设定3个情景(碳排放最优、均衡性最优以及稳定性最优),以探讨不同最优维度下未来电源结构变化,其中碳排放最优情景下将优先配置水风光等新能源,其次基于安全性配置核电、火电等可控能源;均衡性最优情景下将综合考虑各能源的结构均衡配比,并设定可控电源与新能源的配比相差最小;稳定性最优情景下将优先配置火电、核电等可

控大容量电源,其次为满足最大用电需求适当配置风光等新能源。

3 结果和分析

3.1 福建省电力行业电源结构历史与现状分析

福建省2000—2019年发电总量从404亿kW·h增长至2578亿kW·h,呈持续增长趋势(图2(a))。当前电源结构中火电仍占主导地位,占比高达55%;水电占比从2000年的48.32%下降到2019年的17.16%,其占比下降与省内水电资源开发潜力有限以及水电清理措施相关^[39];核电自2013年以来快速发展,至2019年占比约为24%,与近年来宁德核电站、福清核电站的建成与投产相关;风电和光电在近年来也呈现缓慢增长态势,至2019年在电源结构中占比为3.39%、0.62%(图2(b))。

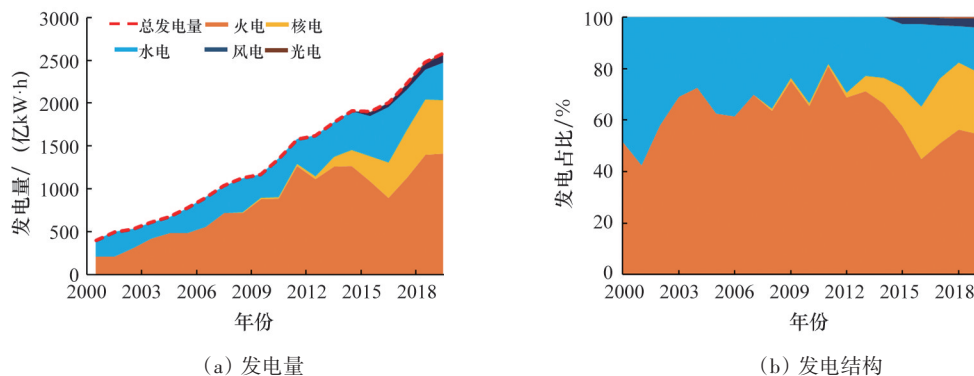


图2 2000—2019年福建省电力行业发电量及发电结构

3.2 福建省电力行业电源结构预测

预计至2060年,福建省陆地生态碳汇将达到6553万t,其中电力行业如按40%考虑,则碳汇配额约为2621万t。随着城市化率和人均GDP的提高,预测福建省电力需求总量将达到5212亿kW·h(指用户终端用电量)。为满足未来碳汇约束和福建省内用电需求,不同情景下的电源结构优化方案如下。

1) “碳排放最优情景”下电源结构优化结果。此情景下将优先发展新能源(水电、风电和光伏),

根据平准化度电成本最小原则和最大装机容量限制,水电、风电和光伏未来最大装机容量分别达到1200万、7000万、5090万kW;为进一步满足未来用电需求,在碳汇约束下火电和核电的未来装机容量需要分别达到586万、2226万kW;另需要增加9379万kW储能设备增加供电稳定性。综上所述,福建全省装机总容量为25482万kW,发电量为5212亿kW·h,其中风电占比36%、储能占比26%、核电占比25%、光伏占比7%、水电占比5%、火电占比1%(图3)。

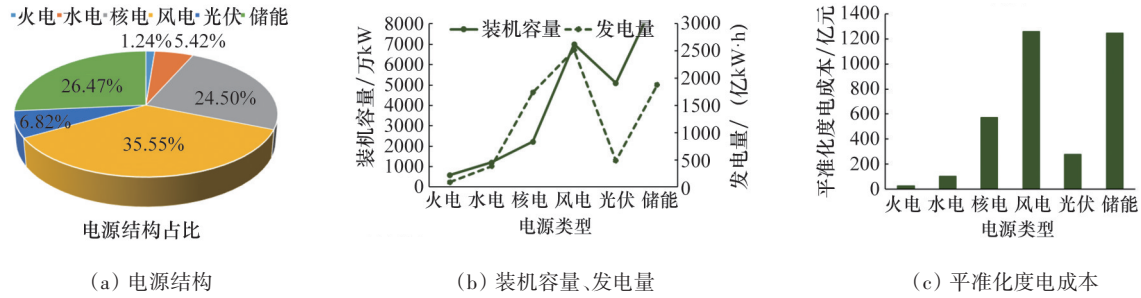


图3 “碳排放最优情景”下的未来电力行业发展预测

该情境下的电源结构调整最大:(1) 新能源在发电结构中的占比高达48%,以火电、核电为主的可控能源在电源结构中的作用从发电主力转型为用电高峰期电量补充;(2) 风电总发电量从当前的87亿kW·h增长至2520亿kW·h,占比从3%增长至36%;(3) 核电总发电量从当前的621亿kW·h增长至1737亿kW·h,占比稳定在25%左右;(4) 光伏总发电量从当前的16亿kW·h增长至484亿kW·h,占比从0.62%增长至7%;(5) 水电总发电量稳定在380亿kW·h左右,占比从17%降低至7%;(6) 火电总发电量从当前的1411亿kW·h降低至88亿kW·h,占比从55%降低至1%。

2) “均衡性最优情景”下电源结构优化结果。此情景下优先保障可控能源(火电、核电)和新能源(水电、风电、光伏)的发电占比差值最小,根据平准化度电成本最小原则和最大装机容量限制,可控能源中火电和核电的未来装机容量预计分别达到2409万、3600万kW,新能源中水电、风电及光伏的未来装机容量分别为1200万、6100万、168万kW,另需增加4778万kW储能设备增加供电稳定性。综上所述,全省装机总容量为18255万kW,发电量为5212亿kW·h,其中风电占比39%、核电占比34%、火电占比12%、储能占比8%、水电占比7%(图4)。

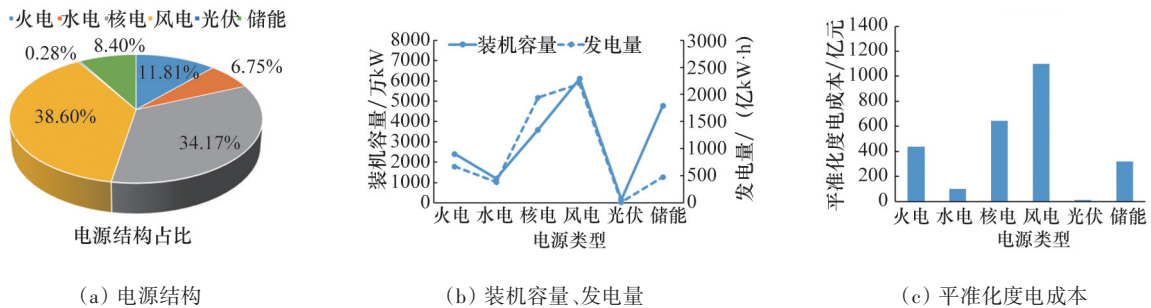


图4 “均衡性最优情景”下的未来电力行业发展预测

该情境下的电源结构调整较碳排放最优情景小:(1) 可控能源和新能源在发电结构中的占比均达46%左右,各电源类型的均衡配比推动了电源结构向多样化方向发展;(2) 风电总发电量从当前的87亿kW·h增长至2196亿kW·h,占比从3%增长至39%;(3) 核电总发电量从当前的621亿kW·h增长至1944亿kW·h,占比从24%增长至34%;(4) 火电总发电量从当前的1411亿kW·h降低至

672亿kW·h,占比从54.74%降低至12%;(5) 水电和光伏总发电量则稳定在当前水平。
3) “稳定性最优情景”下电源结构优化结果。此情景下将优先发展可控能源(火电和核电),根据平准化度电成本最小原则、最大装机容量限制以及全省煤电普及CCUS的条件下(90%以上),火电和核电预计未来装机容量最大可达到6854万、3600万kW;为进一步满足未来用电需求,在碳汇约束下

水电、风电和光伏的未来装机容量需分别达到1200万、4828万、168万kW;另需增加3887万kW储能设备增加供电稳定性。综上所述,全省装机总

容量为20537万kW,发电量5212亿kW·h,其中核电占比34%、风电占比31%、火电占比20%、储能和水电占比7%、光伏占比1%(图5)。

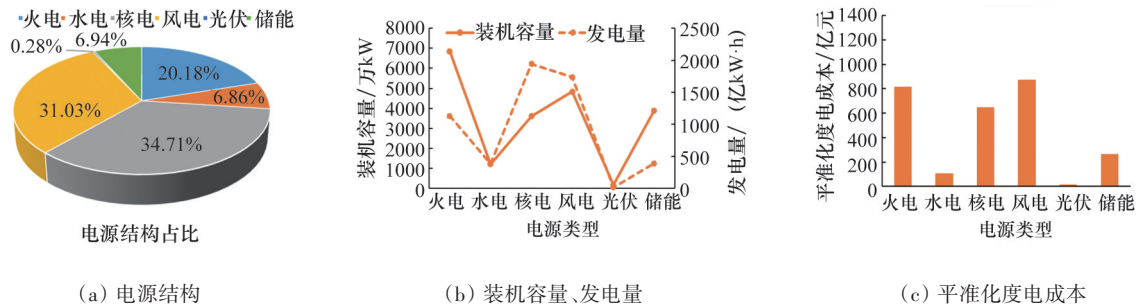


图5 “稳定性最优情景”下的未来电力行业发展预测

该情境下的电源结构调整最小:(1) 可控能源在发电结构中的占比达55%,极大提升了电源结构稳定性;(2) 核电总发电量从当前的621亿kW·h增长至1944亿kW·h,占比从24%增长至34%;(3) 风电总发电量从当前的87亿kW·h增长至1738亿kW·h,占比从3%增长至31%;(4) 火电总发电量从当前1411亿kW·h降低至1130亿kW·h,占比从54.74%降低至20%;(5) 水电总发电占比均稳定在当前水平。

4 结论

以电力行业在2060年实现行业碳中和为目标,综合考虑经济成本、生态碳汇、社会用电需求、省内电力资源开发潜力、供电稳定性等社会-经济-生态目标,构建了电源结构优化模型并评估了未来福建省电源结构的潜在转型方案。研究结果表明:(1) 未来若全省形成以新能源为主、碳排放较低的能源结构,水电、风能、光伏在电源结构中的占比总和达48%,此情景下大幅加装可再生能源和储能设备导致系统总成本负担最大(3479亿元)。(2) 若形成电源结构较为丰富、配置合理的能源结构,可控能源(火电、核电)和新能源(水电、风电、光伏)在发电结构中的占比均在46%左右。此情景下电力系统具有较高的均衡性和较好的经济性(2631亿元),但前提是至少55%以上的燃煤发电

须推广CCUS技术。(3) 若形成可控能源为主导、稳定性较好的能源结构,可控能源(火电、核电)在电源结构中的占比最高可达55%。此情景下大比例煤电技术推广对系统的经济负担最重(90%以上),但系统整体稳定性最高。本研究还发现,若未来福建省82%以上的燃煤发电推广CCUS技术且每年获得超过2620万t的自然碳汇“配额”,则全省仍可保持以火电和核电为主的电源结构,否则须进行电源结构的重大调整,形成以清洁能源为主的电源结构新格局以推动全省“2060年碳中和”目标的实现。

相应提出如下政策建议:充分认识未来生态碳汇趋势发展对电力行业电源结构转型的影响,大力发展生态碳汇,利用省内丰富森林资源,开发和完善高效的森林管理措施,为全社会提供更高的生态碳汇能力;考虑当前火电仍为主导的电源结构格局,鼓励火电转型,加快洁净煤技术、低碳技术的研发和普及,降低电厂的二氧化碳排放强度,进而实现火电从高污染发展向绿色低碳发展转型;优化发电能源结构,追求能源结构多样化,但需避免过度排斥或保留火电比重,以确保电源结构组合的稳定性和经济性。

但本研究仍存在以下局限性:仅探索未来省内特定行业实际碳排放量与其碳汇配额相抵消的发展路径,而未考虑未来省际动态碳排放权交易市场借助市场机制控制和减少碳排放的推动性作用。

未来若将碳市场纳入本研究架构,将加大省内行业减排力度,进而为全国碳市场交易中碳排放大省贡献多余碳汇能力;在省内碳汇能力评估中,本研究考虑了省内极具资源禀赋的陆地碳汇,但鉴于海洋碳汇的评估方法、政策标准以及应用市场尚不完善,因此未考虑海洋碳汇对省内碳汇能力的贡献。未来若将海洋碳汇纳入本研究架构,将保留更大比例火电转型,进而有助于减轻未来各情景中可再生能源转型对整个能源系统所带来的冲击。

参考文献(References)

- [1] 张运洲, 张宁, 代红才, 等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 1-11.
- [2] International Energy Agency. Global energy review: CO₂ emissions in 2021[R]. Paris: IEA, 2021.
- [3] Klemm C, Vennemann P. Modeling and optimization of multi-energy systems in mixed-use districts: A review of existing methods and approaches[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110206.
- [4] 解玉磊, 付正辉, 汤焱, 等. 区域电力结构优化模型及温室气体减排潜力[J]. 电力建设, 2013, 34(11): 82-86.
- [5] 吕涛, 高剑. 减排约束下电力结构预测与优化研究: 以江苏省2030年电力结构为例[J]. 科技管理研究, 2018, 38(16): 260-266.
- [6] 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.
- [7] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(2): 17-24.
- [8] 中国人民政治协商会议福建省委员会. 关于“深化我省生态文明建设 推进碳达峰碳中和工作”的调研报告(征求意见稿)[R]. 福州: 中国人民政治协商会议福建省委员会, 2021.
- [9] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [10] 国网福建省电力有限公司经济技术研究院. 各电源类型的年有效运行时间[Z]. 福州: 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 2022.
- [11] 魏世杰, 樊静丽, 杨扬, 等. 燃煤电厂碳捕集、利用与封存技术和可再生能源储能技术的平准化度电成本比较[J]. 热力发电, 2021, 50(1): 33-42.
- [12] 中国大唐集团科学技术研究院. “预见未来”能源转型电力行业创新发展[R]. 北京: 中国大唐集团科学技术研究院, 2019.
- [13] 国际能源署. 最新成本数据披露 全球生物质发电成本持平[EB/OL]. (2018-01-16) [2023-03-01]. <https://news.bjx.com.cn/html/20180116/874348.shtml>.
- [14] 徐若晨, 张江涛, 刘明义, 等. 电化学储能及抽水蓄能全生命周期度电成本分析[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(12): 10-18.
- [15] Schmidt O, Melchior S, Hawkes A, et al. Projecting the future levelized cost of electricity storage technologies[J]. Joule, 2019, 3(1): 81-100.
- [16] 刘铠诚, 何桂雄, 王碧瑶, 等. 电力行业实现2030年减排目标的路径选择及经济效益分析[J]. 节能技术, 2018, 36(3): 263-269.
- [17] 吕涛, 高剑. 减排约束下电力结构预测与优化研究: 以江苏省2030年电力结构为例[J]. 科技管理研究, 2018, 38(16): 260-266.
- [18] 华能华北分公司. 【火电】IGCC大有可为[EB/OL]. (2014-12-10) [2023-03-01]. <https://news.bjx.com.cn/html/20141210/572001-4.shtml>.
- [19] Yu D Y, Liu Y P, Shi P J, et al. Projecting impacts of climate change on global terrestrial ecoregions[J]. Ecological Indicators, 2019, 103: 114-123.
- [20] 吕劲文, 乐群, 王铮, 等. 福建省森林生态系统碳汇潜力[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2188-2196.
- [21] 周伟, 高岚, 刘豪. 广东省森林碳汇潜力分析[J]. 广东农业科学, 2014, 41(1): 232-236.
- [22] 刘凯, 江世浩, 朱文珏. 广东省森林碳汇量估算及其空间效应分析[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(3): 120-126.
- [23] 福建省发展和改革委员会. 《福建省重要生态系统保护和修复重大工程实施方案(2021—2035年)》[R]. 福州: 福建省发展和改革委员会, 2021.
- [24] 国家林业和草原局. 2014—2018中国森林资源报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019: 185-187.
- [25] 肖君. 福建省天然乔木林碳储量动态变化及增汇策略[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 27-32.
- [26] 马晓哲, 王铮. 中国分省区森林碳汇量的一个估计[J]. 科学通报, 2011, 56(6): 433-441.
- [27] 刘景芳, 童书振. 杉木人工林生长过程表编制的研究[J]. 林业科学研究, 1995, 8(2): 164-169.
- [28] 惠柳笛, 刘凡胜, 莫少壮, 等. 桂西北杉木人工林的生物量积累及生产力变化[J]. 亚热带农业研究, 2021, 17(2): 78-83.
- [29] 徐慧芳, 宋同清, 黄国勤, 等. 广西不同林龄马尾松碳

- 储量及分配格局[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(1): 195-203.
- [30] 郭行泽. 不同造林密度马尾松林分生长分析[J]. 低碳世界, 2015(18):311-312.
- [31] 张琼, 洪伟, 吴承祯, 等. 不同桉树人工林生物量与生产力的比较分析[J]. 福建林学院学报, 2006, 26(3): 218-223.
- [32] 张程, 欧阳林男, 陈少雄. 3种初植密度桉树林分生长、材种出材量及经济效益动态分析[J]. 林业科学研究, 2021, 34(4): 58-65.
- [33] 杨敏, 王宝, 叶彬, 等. 新常态下经济电力关系分析与用电需求预测[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 50-56.
- [34] 刘洪久, 沙巨山, 季明月, 等. 苏州电力需求的影响因素及电量预测研究[J]. 常熟理工学院学报, 2014, 28(5): 7-11.
- [35] 福建省统计局. 福建统计年鉴 2001~2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [36] 郑宗明. 福建省生物质发电特点和发展趋势[J]. 上海节能, 2010(5): 17-20.
- [37] 智研咨询. 2017—2023年中国核电行业市场分析及发展趋势研究报告[R]. 北京: 智研咨询, 2018.
- [38] Sun Y W, Hof A, Wang R, et al. GIS-based approach for potential analysis of solar PV generation at the regional scale: a case study of Fujian Province[J]. Energy Policy, 2013, 58: 248-259.
- [39] 福建省人民政府办公厅. 福建省水电站清理整治行动方案[A]. 福州: 福建省人民政府办公厅, 2021.

Optimization of power supply structure in Fujian province toward the carbon neutrality target

FANG Chaoxiong¹, HU Zhenda¹, CHEN Hanshi^{2,3}, ZHANG Linyao¹, TU Xiazhe¹, LIU Yupeng^{2,4}, CHEN Weiqiang^{2,3*}

1. Economic Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd, Fuzhou 350012, China
2. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Xiamen 361021, China
3. Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China
4. Xiamen Key Laboratory of Smart Management of Urban Environment, Xiamen 361021, China

Abstract Transition to "cleaner" electricity is crucial to achieving the target of carbon peak and carbon neutrality in China and it depends on structure optimization. In this study, a multi-objective model is established to optimize electricity structure in Fujian province under three carbon sink scenarios in 2060. The results show that: (1) Currently, the thermal power still dominates the electricity generation, the hydropower has peaked, the nuclear power is increasing, and the other sources (e.g., wind, solar, biomass) begin to grow. (2) Under the optimal carbon emission scenario, Fujian province has to increase its installed capacity of electric power to 255 million kilowatts, rapidly develop renewable energy, and widely apply energy storage batteries in 2060. (3) Under the optimal power structure scenario, Fujian province would need to increase its installed capacity of electric power to 180 million kilowatts and form a balanced source of electricity. (4) Under the optimal power structure stability scenario, the installed capacity of electric power merely has to reach 205.5 million kilowatts, but the costs on construction and upgrading of the Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) technology would be very high. In summary, the coverage of CCUS higher than 82% and the annual natural carbon sink "quota" of electricity sector exceeding 26.2 million tons are two thresholds for Fujian province to form a renewable and "clean" electricity and achieve carbon neutrality in 2060.

Keywords carbon neutrality; power structure; optimization model; scenario analysis ●



(责任编辑 刘志远)