

文章编号:1006-2467(2021)12-1567-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.294

“双碳”目标下电力系统供给侧形态发展 系统动力学建模与分析

陈文淑乐, 向月, 彭光博, 刘友波, 刘俊勇

(四川大学 电气工程学院, 成都 610065)

摘要: 为了模拟双碳目标对电力系统供给侧形态发展的影响,通过分析电源结构转型过程中碳排放的主要影响因素及其相关关系,构建 4 种不同发展情景的系统动力学模型. 仿真分析了 4 种发展路径下发电结构、电力碳排放的演化趋势. 结果表明:电力系统能源供给侧形态发展受多种因素的共同影响,在政策大力支持的前提下,市场消纳机制和消纳技术的发展促进电力系统发电结构的转型,对双碳目标的实现具有重要意义.

关键词: 双碳目标;供给侧;碳排放;系统动力学

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

System Dynamic Modeling and Analysis of Power System Supply Side Morphological Development with Dual Carbon Targets

CHEN Wenxule, XIANG Yue, PENG Guangbo, LIU Youbo, LIU Junyong

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to simulate the impacts of carbon peaking and carbon neutrality goals on power system supply side transformation from, the system dynamics method is used to analyze the main influencing factors for carbon emissions in the process of power structure transformation and their correlations under four different development scenarios. The evolution of power generation structure and power carbon emission in four development paths are studied. The results show that the power system supply side transformation would be affected by many factors. Under the premise of policy support, the development of market absorption mechanism and absorption technology would contribute to the transformation of the power generation structure, which is of great significance to the realization of the dual carbon targets.

Key words: carbon peaking and carbon neutrality goals; supply side; carbon emissions; system dynamics

中国提出力争在 2030 年前实现碳达峰,努力争取在 2060 年前实现碳中和. 从二氧化碳的排放源分析,与能源有关的碳排放占比近九成,其中电力的碳排放又占到八成,能源供给侧变革成为碳中和技术的主线^[1-3]. 因此,研究双碳目标下未来电力系统中

能源供给侧结构如何演化十分必要.

系统动力学(System Dynamics, SD)于 1956 年创立,在 20 世纪 70 年代被引进中国. 通过对系统论、信息论、控制论进行有机结合,SD 能够定性和定量地分析多变量、多重反馈、高阶次、高度非线性的

收稿日期:2021-07-30

基金项目:国家电网公司科技项目“多目标动态平衡的电网投资规划技术与价值衍生评估研究”(1400-202157215A-0-0-00)

作者简介:陈文淑乐(1998-),女,重庆市人,硕士生,从事低碳电力系统研究.

通信作者:向月,男,副教授,博士生导师,电话(Tel.):028-85405614;E-mail:xiang@scu.edu.cn.

变量关系,是解决复杂系统中多元信息反馈问题的有效方法之一,在解决电力系统相关领域的问题方面也体现出了一定的优越性^[4-5].

基于中国输配电价政策,文献[6]研究了输配电价政策对电网企业现金流的影响,运用SD理论建立了企业投资优化决策模型,并以某市为例对电力市场改革后电网企业的投资决策提出建议和政策含义.文献[7]搭建了分布式光伏电能共享与配电网层面交互模型的SD模型,分析了不同分布式光伏安装率和上网电价下的共享价值变化.文献[8]通过系统动力学模型生成多种经济发展场景来模拟供给侧结构性改革的不确定性,实现中长期负荷外推预测.

系统动力学在电价分析、电力投资经济性、负荷预测方面已有较多研究,但在能源规划方面的应用较少,尤其是电力系统能源供给侧改革中少有应用.在“碳中和、碳达峰”背景下,通过对比其他国家,围绕技术链和产业链,文献[9]提出中国能源高质量发展的3个显性途径和1个隐性途径,建议将关键核心技术纳入国家科技计划.文献[10]调研国内外智能电网的背景、发展现状、关键技术,对我国建设智能电网的关键技术进行分析.文献[11]将产能投资和设备资产动态演化解耦,建立能源替代模型,揭示了天然气消费替代带来的能源供应安全冲击和能源设备资产搁浅的形成机理.基于我国30个省份的面板数据,文献[12]评估了碳交易市场规模的碳减排效应.文献[13]以发电市场碳减排政策为研究对象,构建了基于SD理论的发电行业市场节能减排政策影响模型,分析不同政策情景下,对碳减排及电力市场的影响.已有研究中对能源发展路径、智能电网主要技术、电能替代、减碳效应等进行了分析,但限于研究时未考虑电力系统中供给侧能源演化发展与碳排放之间的相互影响关系,无法定量分析供给侧能源发展路径中各因素对碳减排的贡献程度.

针对以往研究的不足,本文在长时间尺度下探讨不同情景碳排放可能发生的变化,从电力系统发电结构转型的角度出发,提出一种基于系统动力学的能源网发展演化模型,综合考虑双碳目标的政策指导、技术发展应用、电力市场潜力等影响因素.

1 系统动力学模型构建

SD首先以实际观测到的初始系统信息为基础,然后再辅以计算机仿真模拟技术帮助分析者进行路径优化从而预测系统行为变化,具体系统动力学建模步骤如图1所示.

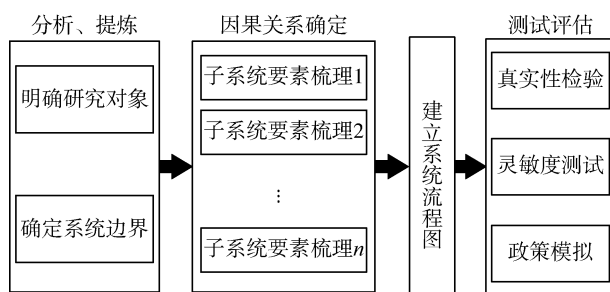


图1 系统动力学模型建模步骤

Fig. 1 Modeling steps of system dynamics model

2 SD模型构建

2.1 分析提炼关键因素

基于SD建模原理,根据《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》^[14]对能源供给侧结构性改革作出的要求,非化石能源在一次能源消费中的比重、非化石能源发电量占比、电力系统碳排放总量都是重要考虑因素.人口数量、全社会用电量、国民生产总值的变化会引起电力需求的变化.电力需求决定总发电量,结合装机容量、投资力度、发电消纳水平,也会对新能源发电量起到一定的影响作用.绿证数量与新能源发电量有对应关系,其规模和交易直接造成发电结构的变化,进而影响电力碳排放.

总之,当电力碳排放呈增长趋势时,在双碳背景下,国家会对行业减排制定相应的政策措施.搭建图2所示的因果回路图,包括电力需求模块、电力技术模块、发电消纳模块、绿证市场模块以及能源消耗和碳排放模块.

2.2 模型主要关系及参数说明

2.2.1 政策投资模块 政策投资模块模拟政府投资行为,主要影响新能源新增装机容量,动力学演化模型如图3所示.

$$I_{t,b} = I_{t,p} k_{t,i} \quad (1)$$

$$I_{t,p} = I_{t0,p} + \sum_{t0}^T k_{t,i} I_{t0,p} \quad (2)$$

$$C_{t,inc} = k_{t,b-c} I_{t,b} + E_{t,nd} k_{t,e-c} P_{t0,gp} / (P_{t,gp} t_{t,c}) \quad (3)$$

$$C_{t,c} = C_{t0,c} + \sum_{t0}^T C_{t,inc} \quad (4)$$

式中: $I_{t,b}$ 、 $k_{t,i}$ 为投资变化和投資变化率; $I_{t,p}$ 为投資力度; $I_{t0,p}$ 为仿真初始年限的投資力度; 投資力度会促进新能源新增装机,具体由式(3)给出,其表明新能源新增装机容量 $C_{t,inc}$ 不仅与投資变化有对应关系,还受電力需求 $E_{t,nd}$ 、当年绿证价格 $P_{t,gp}$ 、新能源平均利用时间 $t_{t,c}$ 的影响, $k_{t,b-c}$ 、 $k_{t,e-c}$ 为相应系数. 式(4)给出新能源装机容量 $C_{t,c}$ 计算式,由仿真初始年限新能源装机容量 $C_{t0,c}$ 和新能源新增装机

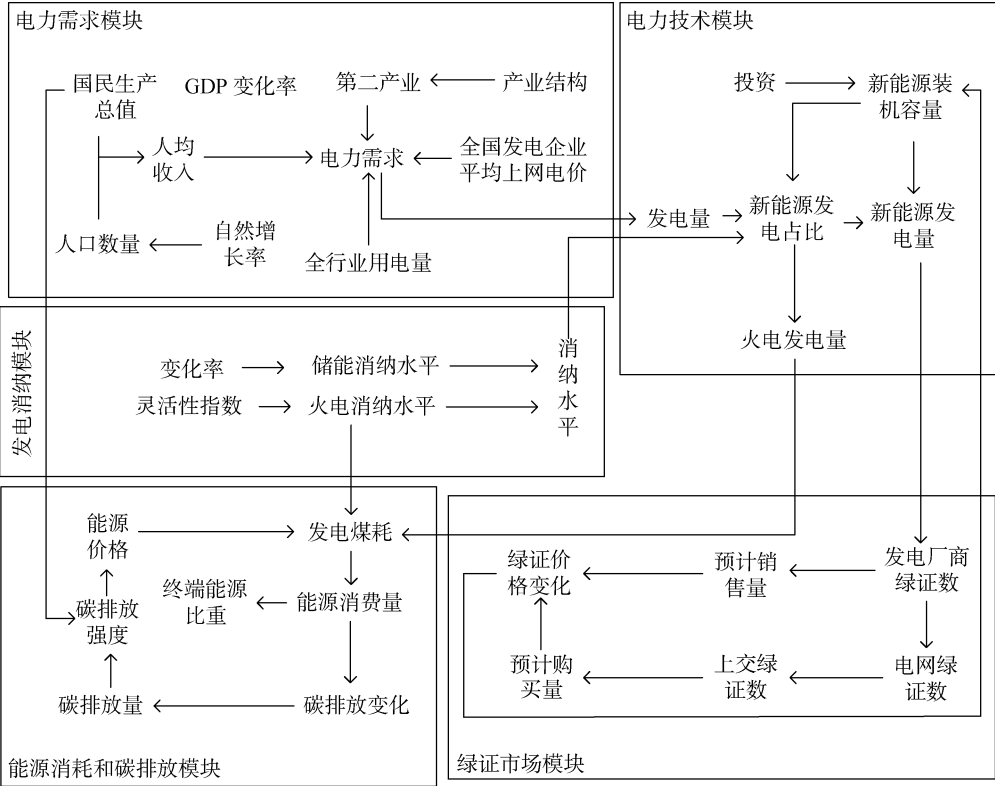


图 2 因果回路图
Fig. 2 Causal loop diagram

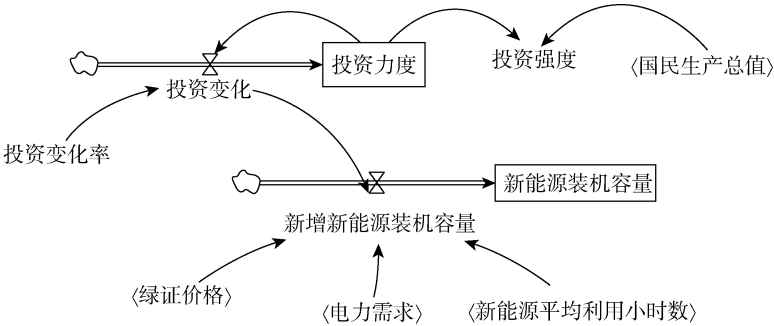


图 3 政策投资模块
Fig. 3 Policy investment module

容量 $C_{t,inc}$ 计算得到。

2.2.2 电力需求模块 用电需求是推动电力碳排放的正向因素,用电需求主要受经济发展水平、人口、全国发电企业平均上网电价、产业结构等因素的影响。用电需求和经济发展水平呈现高度相关性,特别是第二产业和第三产业的用电量和相应产业 GDP 增加值的相关性在 99% 以上^[15]。人口数量的稳步增加也会对电力消费及碳排放产生较大影响,电力需求子模块的动力学演化模型如图 4 所示。

$$P_t = P_{t_0} + \sum_{t_0}^T P_{t_0} p_{t,inc} \tag{5}$$

$$G_t = G_{t_0} + \sum_{t_0}^T G_{t_0} g_{t,inc} \tag{6}$$

$$P_{t,G} = G_t / P_t \tag{7}$$

$$E_{t,h} = E_{t_0,h} + \sum_{t_0}^T E_{t_0,h} k_{h,inc} \tag{8}$$

$$E_{t,nd} = n_1 P_{t,G} + n_2 P_{t,avg} + n_3 P_{t,s} + n_4 E_{t,h} \tag{9}$$

式中: P_t 为仿真年限人口数量; P_{t_0} 为仿真初始年限人口数量; $p_{t,inc}$ 为人口增长率; G_t 为国民生产总值; G_{t_0} 为仿真初始年限 GDP; $g_{t,inc}$ 为 GDP 增长率。式 (6)、(7) 分别给出仿真年限人口数量和国民生产总值计算式, $P_{t,G}$ 为人均收入, $E_{t_0,h}$ 、 $k_{h,inc}$ 分别为仿真初始年限的全行业用电量、行业用电增长率。全行业用电量 $E_{t,h}$ 用式 (8) 表示, 总电力需求用式 (9) 表示, n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 分别为人均收入 $P_{t,G}$ 、全国发电企

量; $C_{t,f}$ 为火电企业装机容量. 火电企业机组发电量和参与辅助服务的电量决定火电企业的煤耗量, k_{e-c} 为电煤转换系数,关系式如式(15)所示. 式(16)、(17)分别给出火电企业设备平均利用时间 $t_{t,f}$ 、新能源平均利用时间 $t_{t,c}$ 的计算式.

2.2.4 绿证市场模块 绿证市场模块的动力学演化模型如图 6 所示,主要考虑煤耗成本、煤价、绿证收益等因素. 煤耗成本和煤价对电力碳排放起到一定的抑制作用,其动力学演化模型耦合在电力需求子模块及能源消耗和碳排放子模块中. 绿证是衡量清洁能源发电量的指标,新能源发电量越多,对电力碳排放的抑制作用越强. 在市场中销售绿电,新能源发电企业得到相应的收益,也会促进新能源机组的发展.

$$P_{t, gp} = P_{t0} + P_{t, ex}$$
$$P_{t, ex} = (q_{t, pg} - q_{t, sg}) / q_{t, sg}$$
$$N_{t, ger} = N_{t0, ger} + G_{t, l} - G_{t, grid}$$

(18)

(19)

(20)

式中: $P_{t, gp}$ 为绿证价格变化,由绿证初始价格 P_{t0} 和绿证超额需求 $P_{t, ex}$ 决定; $q_{t, pg}$ 为预计购买量; $q_{t, sg}$ 为预计销售量; $N_{t, ger}$ 为绿证厂商所持有的绿证数量; $N_{t, grid}$ 为电网所持有的绿证数量. 超额需求是预计购买量和预计销售量的差值函数,如式(19)所示. 式(20)、(21)给出绿证厂商和电网所持有的绿证数量,其中间数量关系由式(22)、(23)给出, $N_{t0, ger}$ 、 $N_{t0, grid}$ 为仿真初始年限绿证厂商、电网持有的绿证数量; $G_{t, l}$ 为新能源发电量所对应的绿证数量,也就是绿证厂商获得的绿证数量; $G_{t, grid}$ 、 $G_{t, up}$ 分别为电网获得的绿证和上交的绿证; k_{cpro-l} 为新能源发电量和绿证数量的转换关系; P_q 为配额比例.

2.2.5 发电消纳模块 发电消纳模块的动力学演化模型如图 7 所示. 储能和火电机组灵活性改造是

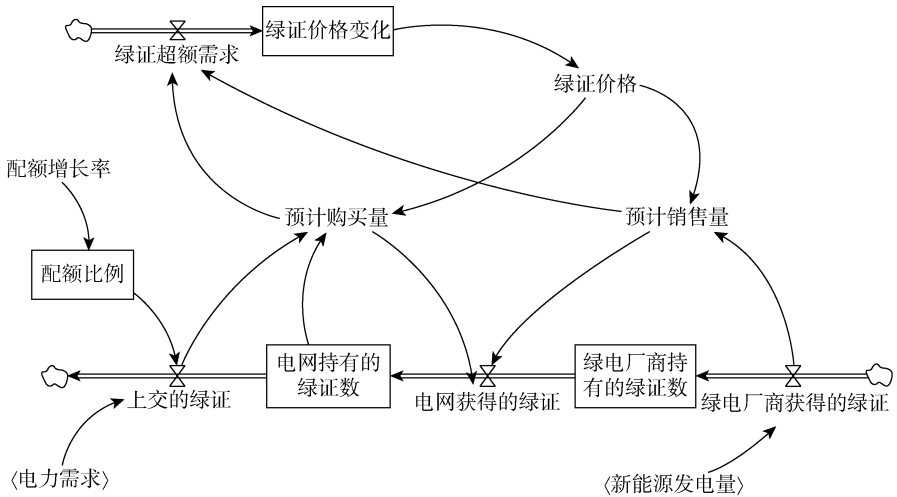


图 6 绿证市场模块
Fig. 6 Power market module

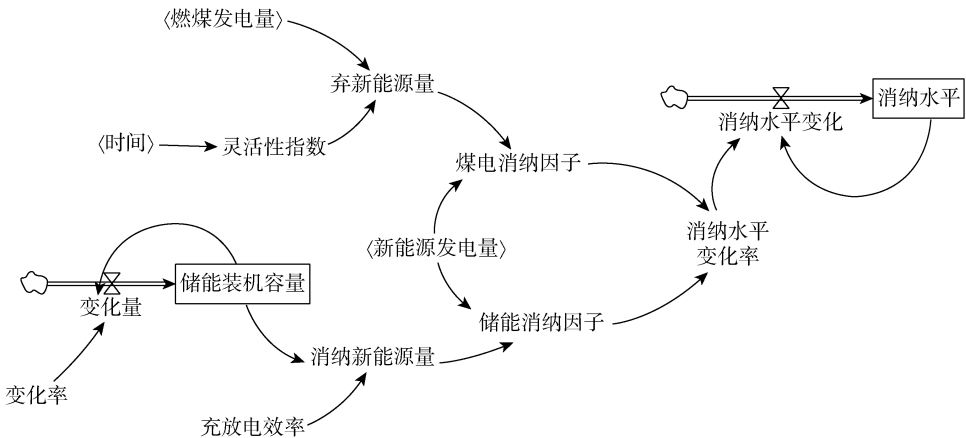


图 7 发电消纳模块
Fig. 7 Power generation consumption module

消纳清洁能源的重要方式. 在新能源资源丰富时, 储能的装机容量直接影响弃新能源的多少, 火电机组减少出力也能最大程度减少弃新能源量. 在新能源出力较低时, 储能放电和增大火电机组出力都是缓解新能源出力不够的有效措施.

$$Q_{t,x} = Q_{t0,x} + \sum_{t0}^T Q_{t0,x} k_{t,x}$$

(24)

$$k_{t,x} = c_{t,x} + s_{t,x}$$

(25)

$$c_{t,x} = Q_{t,x} / Q_{t,cpro}$$

(26)

$$s_{t,x} = Q_{t,s} / Q_{t,cpro}$$

(27)

$$Q_{t,x} = k_{t,fe} Q_{t,fpro}$$

(28)

$$Q_{t,s} = \eta_{t,s} C_{t,s}$$

(29)

$$C_{t,s} = C_{t0,s} + \sum_{t0}^T C_{t0,s} k_{t,s}$$

(30)

式中: $Q_{t,x}$ 为消纳量; $Q_{t0,x}$ 为仿真初始年限消纳量; $k_{t,x}$ 为消纳水平变化率. 在本模型中, 消纳水平变化率主要受煤电消纳因子 $c_{t,x}$ 和储能消纳因子 $s_{t,x}$ 的影响. 煤电消纳水平通过火电机组灵活性指数 $k_{t,fe}$ 体现, 储能消纳水平通过储能装机容量 $C_{t,s}$ 和充放电效率 $\eta_{t,s}$ 体现, $Q_{t,x}$ 、 $Q_{t,s}$ 为弃风弃光量; $C_{t0,s}$ 为仿真初始年限储能装机容量; $k_{t,s}$ 为储能变化率.

2.2.6 能源消耗和碳排放模块 能源消耗和碳排放子模块的动力学演化模型如图 8 所示. 能源利用效率高低直接通过发电煤耗体现, 发电能源结构和发电技术又是造成发电煤耗过高的原因, 煤耗降低对碳排放起到直接抑制作用.

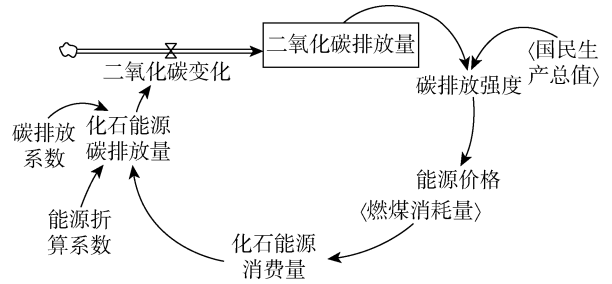


图 8 能源消耗和电力碳排放模块

Fig. 8 Energy consumption and power carbon emission modules

$$Q_{t, fos} = Q_{t, coal} \lambda_{c-f}$$

(31)

$$C_{t, fos} = Q_{t, fos} S_{t, fos} k_{fos-c}$$

(32)

$$C_t = C_{t0} + \sum_{t0}^T C_{t, fos}$$

(33)

$$C_{t, en} = C_t / G_t$$

(34)

$$P_{t, raw} Q_{t, raw} = P_{t, sta} Q_{t, sta}$$

(35)

式中: $Q_{t, fos}$ 为化石能源消费量, 与燃煤消耗量的关系由 (31) 给出, 其直接影响化石能源碳排放量 $C_{t, fos}$, 如式 (32) 所示. λ_{c-f} 为燃煤消耗量与化石能源消耗量的转换系数; $S_{t, fos}$ 、 k_{fos-c} 分别为化石能源对标煤的折算系数以及化石能源的碳排放系数. 电力系统碳排放主要由化石能源碳排放决定, 式 (33) 给出电力系统二氧化碳排放量的计算式, C_{t0} 为仿真初始年限碳排放量. $C_{t, en}$ 为碳排放强度, 指每单位国民生产总值所带来的二氧化碳排放量^[16], 反映碳排放量和经济之间的关系. 本文中能源价格指原煤价格, $P_{t, raw}$ 、 $P_{t, sta}$ 表示原煤和标煤的价格; $Q_{t, raw}$ 、 $Q_{t, sta}$ 表示原煤量和标煤量, 《中华人民共和国价格法释义》^[17] 中规定计划电煤采用政府指导价格, 在社会资源一定的情况下, 原煤价格上涨时, 标煤量会减少, 关系如式 (35) 所示, 会间接减少碳排放, 进而影响碳排放强度.

3 算例仿真

3.1 算例基础数据

随着电力系统复杂性和不确定性的增强, 系统环境日益复杂, 本文采用情景预测分析方法^[18-19]对未来发展情况进行分析和预测. 通过分析系统特定因素之间的互相联系, 产生可能出现的情景模式.

为全面模拟我国电力系统转型过程中可能出现的碳排放路径, 本文设置基准情景、低碳情景、超低碳情景 3 种情景进行模拟, 具体情况将在后文中详细叙述.

为验证前文所构建模型在各种情景下的可行性和有效性, 调研中国电力企业协会数据和中国统计年鉴得到关键参数, 如表 1 所示. 调用 Vensim 软件, 仿真分析投资力度、能源侧结构变化、关键技术发展等因素对发电结构、碳排放量的影响. 仿真初始时间设为 2020 年 1 月, 结束时间为 2030 年 12 月, 共 120 个月, 时间步长为 1 个月.

表 1 参数初始值

Tab. 1 Initial value of parameters

参数	初始值	参数	初始值
配额增长率/%	0.13	线损率/%	0.06
电力标煤转化系数×10 ⁴ /[t·(kW·h) ⁻¹]	1.229	新能源装机容量×10 ⁻⁸ /kW	5.852 5
国民生产总值×10 ⁻¹² /元	101.599	GDP 变化率/%	0.023
人口数量/亿	14.117 8	人口增长率/%	0.53

3.2 仿真结果及分析

3.2.1 基准情景 基准情景考虑的发展驱动是投资力度. 未来十年我国新能源新增装机容量要达到 7×10^8 kW, 平均投资变化率为 9.15%. 人口、全社会用电量、电力行业技术等指标延续历史发展的自然规律, 不考虑碳排放对行业发展的约束, 政府通过现行的环境排放标准版和有限的经济调控手段引导电力行业投资, 仿真结果如图 9 所示.

仿真结果表明即使政府大力投资新能源, 由于新能源发电技术成本较高, 累计装机容量、装机占比、发电量比例增长缓慢. 除此之外, 为满足电力需

求, 火电企业燃煤发电量逐年增加, 电力系统碳排放近似呈现线性增长趋势.

3.2.2 低碳情景 低碳情景考虑我国环境与经济的协调、低碳可持续发展等因素. 在基准情景的投资力度下, 分别考虑发电技术发展(低碳情景 1)和市场监管(低碳情景 2)对新能源消纳量的影响, 进而影响电力系统转型过程中的碳排放.

低碳情景 1 主要考虑火电机组的灵活性改造和储能规模化发展对弃新能源的影响, 仿真结果如图 10 所示.

绿证市场是我国电力市场的发展趋势, 绿电的

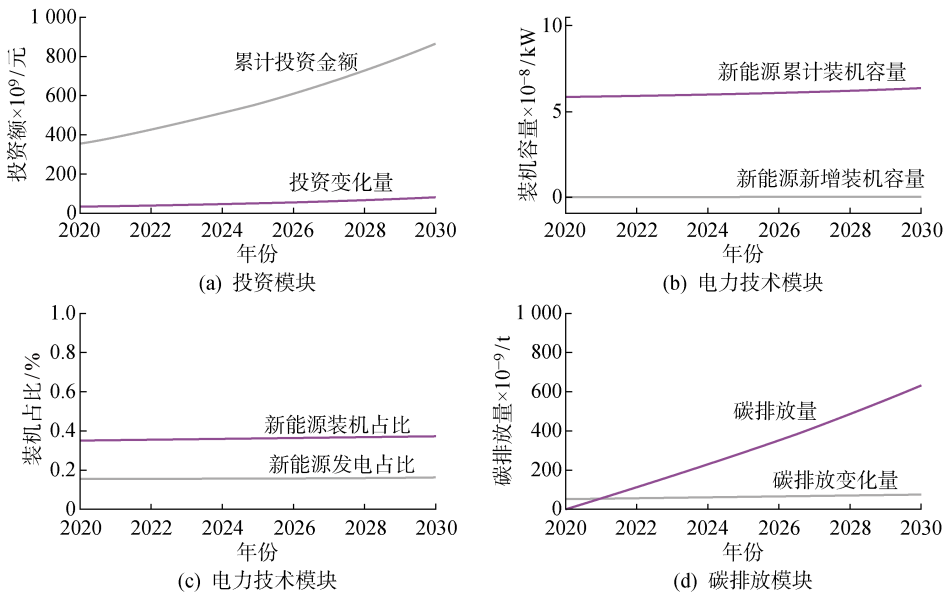


图 9 基准情景下电力系统指标变化

Fig. 9 Changes of power system index under base scenarios

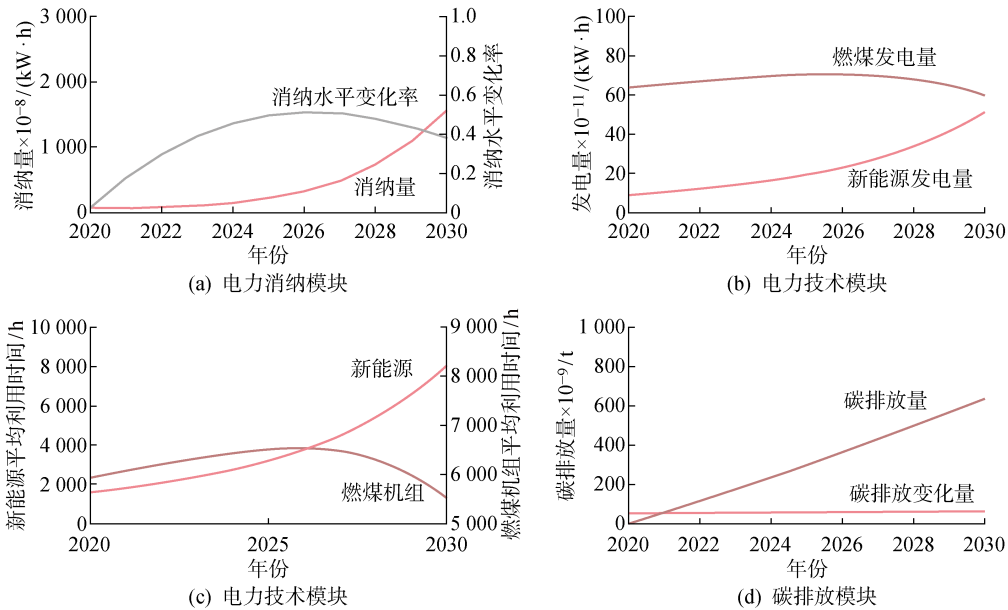


图 10 低碳情景 1 下电力系统指标变化

Fig. 10 Changes in power system indicators under low-carbon scenarios 1

交易不仅会影响新能源厂商的收入,间接影响装机容量,也是促进消纳新能源的重要方式之一,低碳情景 2 的仿真结果如图 11 所示.

在基准情景下,提倡低耗能和节能减排,火电机组灵活性改造和市场消纳机制投入示范运行或进入商业应用,带动发电效率提升.由于低碳和节能减排政策的影响,绿证市场快速发展,新能源机组逐渐增多,燃煤机组的增长速度受到约束,燃煤机组发电量略受影响,燃煤机组仍然是主要发电形式.此种情况

下,弃新能源的现象未得到解决,新能源的发电占比增长相对缓慢.

3.2.3 超低碳情景 超低碳情景主要考虑电力新技术的进步和市场消纳机制的协同作用.强化电力行业技术进步,建设坚强电网,协调新能源并网问题,新能源得到快速发展,增加低碳调度运行方式的灵活性.结合基准情景、低碳情景,得到图 12 所示仿真结果对比图.

基于不同发展路径,图 12 给出未来十年电力系

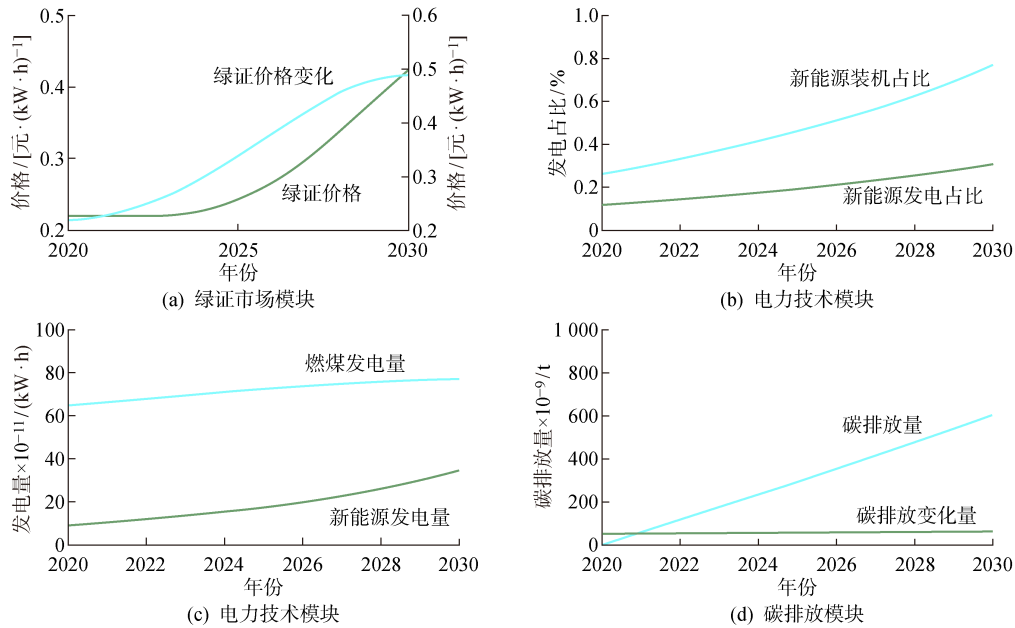


图 11 低碳情景 2 下电力系统指标变化

Fig. 11 Changes in power system indicators under low-carbon scenarios 2

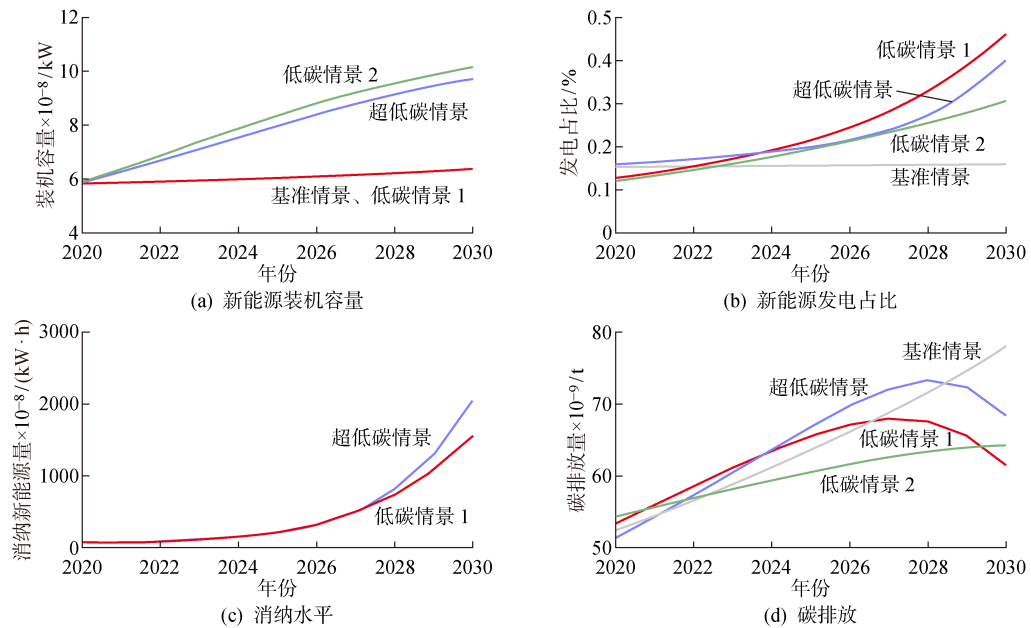


图 12 3 种情景电力系统主要指标对比

Fig. 12 Comparison of main indexes of power systems under three scenarios

统主要指标的演化趋势.通过绿证市场交易绿电,绿电厂商收益增加,促进新能源装机增加,间接影响燃煤机组装机,低碳情景 2 对新能源装机容量的促进作用最明显.低碳情景 1 主要考虑灵活性改造的技术发展,“新能源+火电机组”的协调发展得到定量分析,灵活性改造降低火电机组的出力下限,利于火电机组参与辅助服务,促进新能源机组出力,新能源发电占比显著增加.燃煤机组发电逐步被新能源发电替代,其发电量也随之逐渐减少.大约在 2027 年,新能源发电量显著增加,超低碳情景对电力系统新能源的消纳优势更加明显,多种消纳方式协同作用能增强电力系统的稳定性.从碳排放变化角度看,除基准情景外,所模拟的情景均对碳排放均有一定的抑制作用.在仿真年限内,低碳情景 1 大约在 2027 年达到碳排放变化的最大值,超低碳情景大约在 2028 年达到碳排放变化的最大值,低碳情景 2 的碳排放变化最慢,但呈现持续增长的趋势.

4 结语

基于系统动力学,构建了双碳目标下电力系统供给侧形态发展的推演模型.政策投资力度是电力系统转型的基础,清洁能源消纳是关键.通过仿真模拟,验证了模型的可行性和有效性.结果表明:在电力系统供给侧转型初期,发电新技术、市场消纳能力都会限制能源发电结构的发展,此时投资力度对新能源累计装机容量、装机占比及发电量的促进作用不明显,碳排放近似线性增长.随着消纳技术和消纳市场的不断成熟,火电机组灵活性增强、储能规模化发展、绿证市场趋于成熟,对新能源机组出力促进作用增强,新能源发电成为主要发电形式,有效降低电力碳排放,助力双碳目标的实现.

参考文献:

[1] 李辉,孙雪丽,庞博,等.基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力[DB/OL]. (2021-06-16) [2021-07-30]. <https://doi-org-s.era.lib.swjtu.edu.cn/10.13227/j.hjxx.202102167>.
LI Hui, SUN Xueli, PANG Bo, *et al.* Emission potential of thermal power air pollutants based on carbon emission reduction targets and emission standard constraint scenarios[DB/OL]. (2021-06-16) [2021-07-30]. <https://doi-org-s.era.lib.swjtu.edu.cn/10.13227/j.hjxx.202102167>.
[2] 王志轩.构建以新能源为主体的新型电力系统框架[J]. 阅江学刊, 2021, 13(3): 35-43.
WANG Zhixuan. Construction of a new power sys-

tem framework with new energy as the main body [J]. *Yuejiang Academic Journal*, 2021, 13(3): 35-43.
[3] 本刊编辑部.构建以新能源为主体的新型电力系统为实现碳达峰、碳中和目标添柴加薪[J]. 农村电气化, 2021(6): 1.
Editorial Department. Construction of a new power system with new energy as the main body to achieve the goal of carbon peak, carbon neutral fuel increase salary[J]. *Rural Electrification*, 2021(6): 1.
[4] 杜振东,徐尔丰,张笑弟,等.绿色电力证书市场下中国各类电源规模及发电成本演化发展[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 168-176.
DU Zhendong, XU Erfeng, ZHANG Xiaodi, *et al.* Research on evolution and development of power generation scale and cost under tradable green certificates market in China[J]. *Electric Power*, 2019, 52(7): 168-176.
[5] 周昊,刘俊勇,刘友波,等.基于系统动力学的电动汽车规模推演分析与仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(8): 1-7.
ZHOU Hao, LIU Junyong, LIU Youbo, *et al.* Analysis and simulation of electric vehicles scale evolution based on system dynamics[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(8): 1-7.
[6] HE Y X, JIAO J, CHEN R J, *et al.* The optimization of Chinese power grid investment based on transmission and distribution tariff policy: A system dynamics approach[J]. *Energy Policy*, 2018, 113: 112-122.
[7] 张汀荟,谢明成,王蓓蓓,等.分布式光伏的共享价值及其对配电网影响的系统动力学仿真[DB/OL]. (2021-05-16) [2021-07-30]. <https://kns-cnki-net-s.era.lib.swjtu.edu.cn:443/kcms/detail/32.1180.TP.20210514.0842.002.html>.
ZHANG Tinghui, XIE Mingcheng, WANG Beibei, *et al.* System dynamics simulation of shared value of distributed photovoltaic and its influence on distribution network[DB/OL]. (2021-05-16) [2021-07-30]. <https://kns-cnki-net-s.era.lib.swjtu.edu.cn:443/kcms/detail/32.1180.TP.20210514.0842.002.html>.
[8] 王凌谊,王志敏,钱纹,等.适应供给侧结构性改革的中长期负荷预测拓展索洛模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 49-59.
WANG Lingyi, WANG Zhimin, QIAN Wen, *et al.* Extended Solow regression model for mid/long-term load forecasting adapted to supply-side structural reform[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(18): 49-59.

- [9] 刘晓龙, 崔磊磊, 李彬, 等. 碳中和目标下中国能源高质量发展路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(3): 1-8.
LIU Xiaolong, CUI Leilei, LI Bin, *et al.* Research on the high-quality development path of China's energy industry under the target of carbon neutralization [J]. **Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)**, 2021, 23(3): 1-8.
- [10] 李士林. 智能电网技术现状及发展分析[J]. 科技与创新, 2021(3): 28-29.
LI Shilin. Current situation and development analysis of smart grid technology [J]. **Science and Technology & Innovation**, 2021(3): 28-29.
- [11] 王小林, 成金华, 陈军, 等. 天然气消费替代效应与中国能源转型安全[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(3): 138-149.
WANG Xiaolin, CHENG Jinhua, CHEN Jun, *et al.* Substitution effect of natural gas consumption and energy transition security in China [J]. **China Population, Resources and Environment**, 2021, 31(3): 138-149.
- [12] 薛飞, 周民良. 中国碳交易市场规模的减排效应研究[J]. 华东经济管理, 2021, 35(6): 11-21.
XUE Fei, ZHOU Minliang. Research on the emission reduction effect of the scale of China's carbon trading market [J]. **East China Economic Management**, 2021, 35(6): 11-21.
- [13] 张金良, 周秀秀. 基于系统动力学的发电行业市场型碳减排政策影响分析[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 114-123.
ZHANG Jinliang, ZHOU Xiuxiu. Impact analysis of market-oriented carbon emission reduction policies in power generation industry based on system dynamics [J]. **Electric Power**, 2020, 53(6): 114-123.
- [14] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 能源生产和消费革命战略(2016—2030)[J]. 电器工业, 2017(5): 39-47.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Energy production and consumption revolution strategy (2016—2030) [J]. **China Electrical Equipment Industry**, 2017(5): 39-47.
- [15] 刘强, 田川, 郑晓奇, 等. 中国电力行业碳减排相关政策评价[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2368-2376.
LIU Qiang, TIAN Chuan, ZHENG Xiaoqi, *et al.* Evaluation of CO₂ emission reduction policies in China's power sector [J]. **Resources Science**, 2017, 39(12): 2368-2376.
- [16] 张若楠, 杨瑾. 陕西省土地利用碳排放与碳足迹研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(5): 126-130.
ZHANG Ruonan, YANG Jin. Study on carbon emission and carbon footprint of land use in Shaanxi Province [J]. **Agriculture and Technology**, 2020, 40(5): 126-130.
- [17] 卞耀武. 中华人民共和国价格法释义[M]. 北京: 法律出版社, 1998.
BIAN Yaowu. Interpretation of the price law of the People's Republic of China [M]. Beijing: Law Press, 1998.
- [18] 杨方圆, 张明理, 夏德明, 等. 基于偏最小二乘回归的电能替代多情景预测方法[J]. 东北电力技术, 2021, 42(1): 6-10.
YANG Fangyuan, ZHANG Mingli, XIA Deming, *et al.* Multiple scenarios prediction method for electric energy substitution based on partial least squares regression [J]. **Northeast Electric Power Technology**, 2021, 42(1): 6-10.
- [19] 吴静, 谭忠富, 王珂珂, 等. 基于人工鱼群与最小二乘支持向量机的电能替代多情景预测研究[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(12): 11-21.
WU Jing, TAN Zhongfu, WANG Keke, *et al.* Multi-scenario forecast of electric power substitution based on artificial fish and least square support vector machine model [J]. **Mathematics in Practice and Theory**, 2021, 51(12): 11-21.

(本文编辑:陈晓燕)