

中国电力绿色发展中的问题及对策研究

牛东晓¹, 王珂珂¹, 余敏¹

(华北电力大学经济与管理学院, 北京市, 102206)

摘要: 电力工业是国民经济和社会发展的基础产业, 在能源体系中处于核心地位, 电力工业的绿色发展是缓解能源紧张、调整能源结构、减少环境污染和提高能源效率的关键之举。本文在分析我国电力绿色发展现状的基础上, 重点探究了我国电力绿色发展面临的问题, 以此为基础将多能源协同模式作为典型研究对象, 阐述我国电力绿色发展的关键研究点, 总结了我国电力绿色发展面临的关键科学问题, 提出了有针对性的电力绿色发展对策及建议。

关键词: 电力工业; 绿色发展; 新能源; 多能源协同

中图分类号: X22

文献标识码: A

0. 引言

能源是社会进步和人类生存的物质基础[1], 面对日益严峻的全球能源匮乏和环境问题, 开发利用可再生能源, 推动建设以可再生能源为主导的清洁低碳、安全高效的能源体系, 采取节能减排战略[2], 是世界上多数国家的主要战略。我国现有能源体系为中国经济的崛起提供不竭动力[3], OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) 统计数据显示, 中国已成为世界最大的一次能源消费国与温室气体排放国, 随着能源资源约束日益加剧, 能源粗放式利用与生态文明建设的矛盾日渐突出, 资源和环境问题已成为制约中国社会发展的关键, 控制温室气体排放十分紧迫, 绿色低碳发展成为我国经济社会发展的重大战略和生态文明建设的重要途径[4]。电力工业在现代能源体系中处于核心地位, 作为能源消耗和污染物排放的主要行业, 亟需转型升级, 在减少温室气体排放方面发挥重要作用[8], 应加大力度发展绿色电力[5] (指比传统电力更易获得的可再生能源供电[6], 以风电、太阳能、生物质能为核心)。然而, 由于可再生能源发电具有随机性、波动性、间歇性和不确定性的影响, 其大规模接入给电力系统的稳定安全运行带来了严峻的挑战[7], 限制了可再生能源的发展, 制约中国电力绿色发展。因此, 亟需对中国电力绿色发展路径中的薄弱环节进行研究, 促进中国电力绿色化转型升级, 为建设美丽中国, 推动构建人类命运共同体做出更大贡献。

本文结合国家宏观政策, 基于宏观数据, 探究我国绿色电力发展存在的主要问题, 阐述在电力体制改革不断深化的背景下衍生出的多能源协同系统模式对于电力绿色化发展的重要意义, 并提出促进我国电力绿色发展的对策建议。

1. 中国电力绿色发展现状

(1) 清洁能源消费比重逐年增长

“十三五”期间, 中国能源消费增长逐年放缓, 消费结构总体优化。2018年是实施国家《能源发展“十三五”规划》的中期之年。2018年中国能源消费总量为 46.4×10^8 t 标准煤, 较2017年增长3.8%, 为近6年来的峰值, 如图1所示。其中, 煤炭消费量为 27.4×10^8 t 标准煤, 占能源消费总量的59%, 同比增长1.4%, 为三年连续负增长后首次正增长; 天然气消费量为 3.6×10^8 t 标准煤, 同比增长17.2%; 石油消费量为 8.8×10^8 t 标准煤, 同比增长3.0%; 非化石能源消费量 6.6×10^8 t 标准煤, 同比增长8.1%; 清洁能源消费量占能源消费总量的22.1%, 同比增长1.5%。

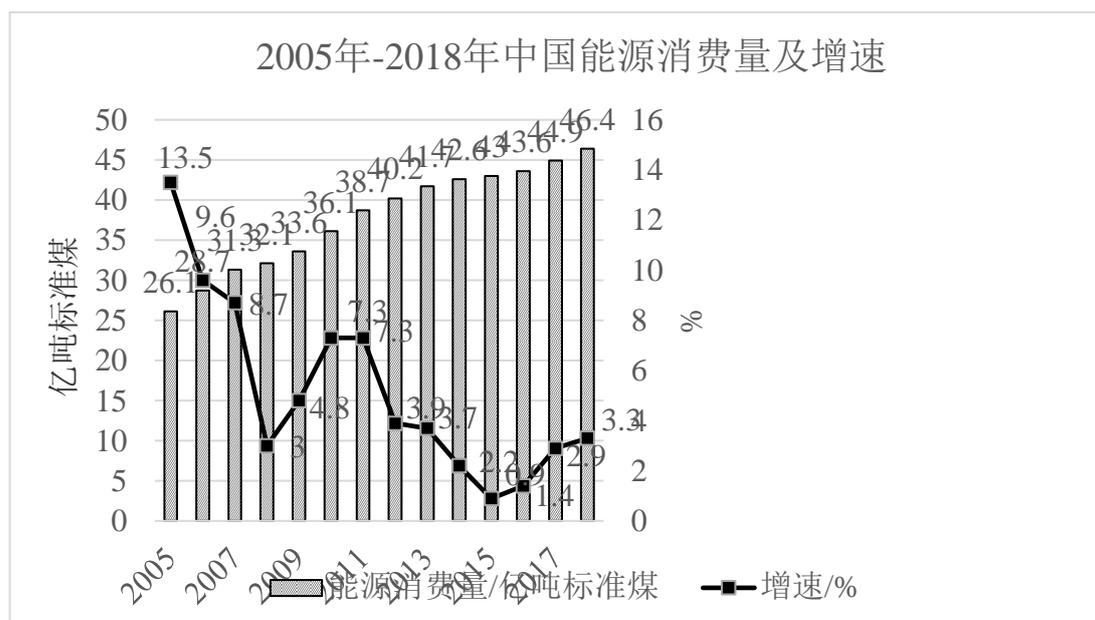


图1 2005—2018年中国能源消费量及增速

2013-2018年，中国能源消费总量从41.7万吨标准煤上升至46.4万吨标准煤。从具体能源消费结构来看，煤炭消费占比由2013年的67.4%下降至2018年的59%，天然气消费占比从2013年的5.3%上升至2018年的7.8%，非化石能源占比由2013年的10.2%上升至2018年的14.3%，见图2，清洁能源消费比重也逐年上升。

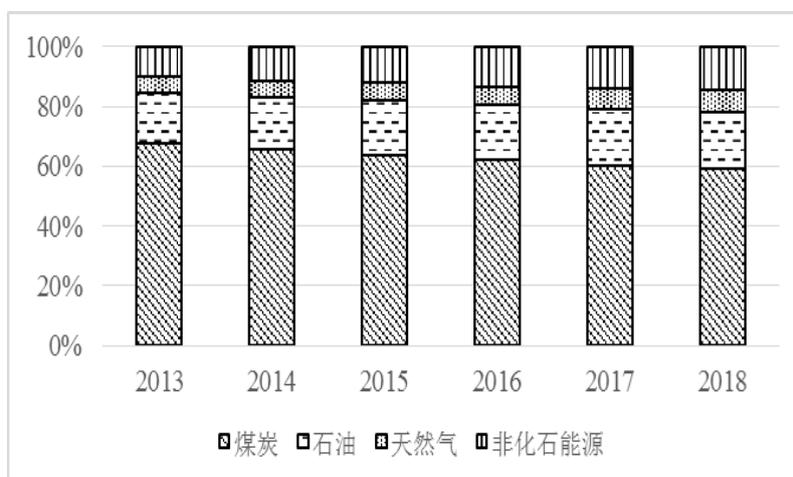


图2 2013—2018年中国能源消费结构

(2) 电源结构绿色转型持续推进

为防范化解煤电产能过剩风险，加快电力绿色发展，中国新增装机增速逐渐放缓，电源结构持续优化。截至2018年底，我国发电装机容量189967万千瓦，同比增长6.5%，增速回落1.2个百分点，见图3。



图3 2010—2018年全国发电装机容量及增速

自2010年以来，我国火电装机比重逐年下降，非化石能源装机占比逐渐上升，风电、光伏等新能源发电装机增速较快，成为电源新增主力，电源装机结构不断优化。截至2018年底，水电装机容量35226万千瓦（含抽水蓄能2999万千瓦），同比增长2.5%，占全部发电装机容量的18.5%；并网风电装机容量18426万千瓦，同比增长12.4%，占全部发电装机容量的9.7%；并网太阳能发电装机容量17463万千瓦，同比增长33.9%，占全部发电装机容量的9.2%，非化石能源装机较2017年增长2.1个百分点，占比为39.8%，见图4。

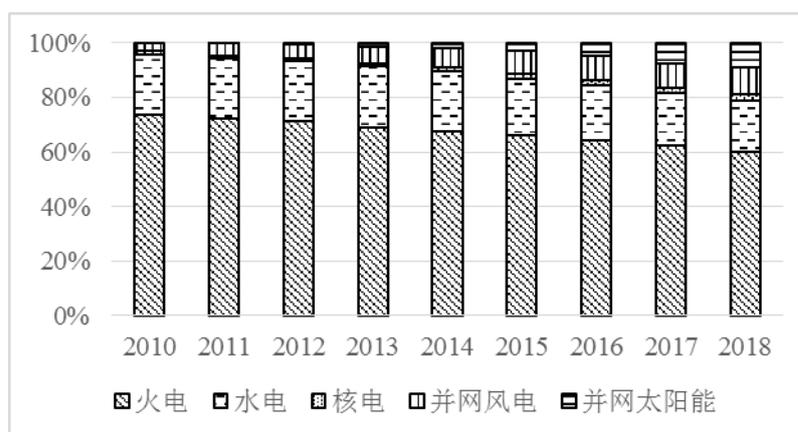


图4 2010—2018年中国发电装机容量结构

现阶段中国的电源结构以火力发电为主，火电装机占比60.2%，火电发电量占比70.39%。受我国“富煤缺油少气”资源禀赋特征的影响，未来很长一段时期内，火力发电仍将是我国基础支撑性电源，风电、太阳能的快速发展不足以改变这种发电格局。火力发电难以灵活调度且占比较高，我国现阶段灵活调节电源占比较低，电网调峰能力弱，在很大程度上加大了新能源消纳的难度。中国电力发展呈现出以火电、水电等传统发电方式为基础，核电、风电、太阳能发电为代表的绿色电力能源快速增长的态势，非化石能源装机容量不断攀升，电源结构绿色转型持续推进，中国已成为全球非化石能源发展的领跑者。

(3) 电力消费结构呈现清洁低碳趋势

电能作为清洁、高效的终端能源，将在我国未来的能源格局中扮演着重要角色。电能占终端能源消费的比重，是衡量一个国家终端能源消费结构和电气化程度的重要指标。提升电能终端能源消费中的比重，是优化我国能源消费结构的重要举措。2019年，我国全社会用电量为72255亿千瓦时，分产业类型来看，第一产业用电量780亿千瓦时，第二产业用电

量 49362 亿千瓦时，第三产业、居民生活用电是全社会用电量持续快速增长的重要动力，在 2019 年仍保持两位数增长。依据我国能源政策走势，提高终端能源电力化水平是未来能源发展的主要趋势，可通过推行电能替代措施，实现以电代煤、以电代油等，提高电力在终端能源消费中的比重。

(4) 电力能耗及环境指标逐步优化

电力行业积极应对气候变化，采取多种有效措施降低能耗和线损率^[8]。2018 年，全国 6000 千瓦及以上火电厂平均供电标准煤耗 307.6 克/千瓦时，煤电机组供电煤耗继续保持世界先进；厂用电率 4.70%（其中，水电 0.26%，火电 5.81%）；全国线损率 6.21%；全国火电厂单位发电量耗水量 1.23 千克/千瓦时；粉煤灰、脱硫石膏综合利用率分别为 71%、74%，综合利用量持续提高。污染物排放进一步降低，全国电力烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放量分别约为 21 万吨、99 万吨、96 万吨，分别比上年下降约为 19.2%、17.5%、15.8%；每千瓦时火电发电量烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放量约为 0.04 克、0.20 克、0.19 克；火电单位发电量废水排放量为 0.06 千克/千瓦时。单位火电发电量二氧化碳排放约 841 克/千瓦时，比 2005 年下降 19.4%，为中国早日实现碳排放承诺做出了贡献。

2. 中国电力绿色发展的困境

(1) 资源禀赋制约碳减排空间

受我国“富煤缺油少气”资源禀赋特征的影响，未来很长一段时期内，火力发电仍将是我国基础支撑性电源，风电、太阳能的快速发展不足以改变这种发电格局，22030 年以后，中国火电产业将逐渐进入衰退期^[9]。现阶段中国的电源结构以火力发电为主，煤炭在能源消费占比较大，为 57.7%^[10]，已有多项研究证实能源消费增长是加剧碳排放的主要原因^[11]。为实现 2030 年碳减排承诺，亟需通过电力绿色化转型以改变当前煤炭为主的能源消费结构。

(2) 能源利用效率仍有待提高

“十三五”时期，国家实施能源消耗总量和强度“双控”行动，要求到 2020 年单位 GDP 能耗比 2015 年降低 15%，能源消费总量控制在 50 亿吨标准煤以内。2018 年中国单位 GDP 能耗为 2.41 吨油当量/万美元^[12]，与世界平均水平及发达国家相比，我国能耗强度仍然偏高，见图 2 所示，且一次能源消费对于煤炭的依赖性大，有较大改善空间。能源利用效率成为电力绿色转型的一大挑战。

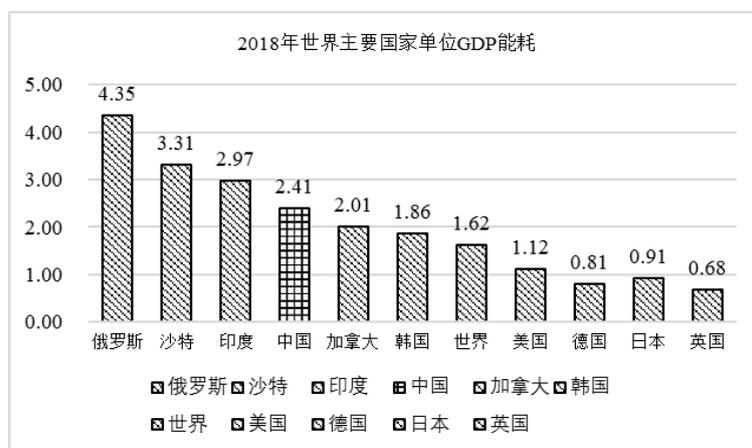


图 5 2018 年世界主要国家单位 GDP 能耗

(3) 新能源发展与利用的矛盾

2019 年全国平均弃风、弃光率分别 4%、2%，弃风弃光现象仍然存在。到 2020 年，中

国水电、风电、太阳能发电装机目标分别为 3.5 亿千瓦时、2 亿千瓦时、1.1 亿千瓦时，亟需解决新能源发展与消纳之间的矛盾，否则弃能现象将进一步加剧。多年来，我国为促进可再生能源产业发展，一直采取“标杆电价+政府财政补贴”的方式，补贴资金来源于可再生能源电价附加，随电费收取。随着风电、光伏装机容量快速攀升，补贴缺口持续扩大。现有新能源产品定价机制存在缺陷，评价机制不完善，严重影响新能源产业的均衡发展^[13]。《关于 2018 年光伏发电有关事项的通知》(发改能源[2018]823 号)指出，在电价上确定“普通光伏和分布式光伏两下调”原则，对光伏建设规模进行了缩减。新能源补贴退坡给风电、光伏行业的发展带来较大困难和不确定性。

我国水能、风能、太阳能等可再生能源分布高度集中，资源富集区与负荷中心逆向分布。我国水力资源 60%集中在西南地区，风电、光伏等开发条件较好的地区集中在西部和北部，而我国电力负荷占全国总负荷 2/3 以上的东部沿海地区经济发达，而能量资源却相对匮乏。火力发电难以灵活调度^[5]，资源富集区缺乏快速跟踪负荷调整的燃机电站与灵活调峰调频的抽水蓄能电站，整体消纳条件不足，制约可再生能源的利用。

3. 中国电力绿色发展模式的探索

世界各国为应对能源需求大幅度增长、环境恶化及能源转换效率低等问题，不断调整能源结构，寻求新的能源发展方式。当前解决途径主要分为两类：①清洁能源逐步替代化石能源，提升新能源的主导地位，走低碳环保的发展道路；②采用阶梯或循环利用能源模式，提高能源利用效率，构建社会能源一体化运行系统^[14]。我国也提出“互联网+”智慧能源行动计划^[15]，以电力系统为核心，利用不同能源之间的转换能力，实现能源协同互补^[16]。多能源协同互补能够精确反映各能源网络间复杂的耦合关系^[17]，且负荷类型多样^[18]，实现多种能源互补共济和高效利用^[19]，为人类社会的可持续发展提供可能^[20]。本文以促进电力绿色发展的多能源协同模式为切入点，阐述其对电力绿色发展的推动效果与积极意义。

随着我国电力体制改革的不断推进，逐步衍生出多种多能源系统模式，即微电网、综合能源系统、能源互联网等三种典型运营模式^[21]。“多能互补集成优化示范工程”已于 2017 年启动^[22]。

(1) 微电网

微电网实质为一种配电方法，以能源优化利用为目标，以分布式能源为依托，由储能系统、能量转换装置、相关负荷、监控和保护装置配备而成的小型发配电系统，是当前智能电网的重要构成^[23-24]。微电网能够实现对风光等清洁能源的集成利用，协调用户与能源传输，促进能源的就地消纳，提高能源利用效率与服务水平^[21]，是有效解决分布式电源直接接入电网所引起的一系列问题的有效手段^[25]。

(2) 综合能源系统

综合能源系统是基于微电网技术逐步发展而成的一种能源供给模式，突破了传统能源结构利用效率低下的壁垒，实现了电、气、热、冷等各类能源的协调规划与调度^[26]，是提高能源利用效率、充分使用可再生能源、以常规能源和可再生能源协同高效利用为特征的新型区域能源供给系统^[27]，是能源互联网的重要物理载体^[28]。综合能源系统是未来能源发展转型变革的核心方向^[29]，是我国能源革命的重要突破口，是助力我国“清洁低碳、安全高效”的现代能源体系建设的有力推手。因此，从我国自身实际需求出发，探索和建立适用于

我国的综合能源系统理论体系是具有重要的战略意义。

综合能源系统的发展有助于帮助解决能源安全问题，提高社会效率，促进间歇性新能源和可再生能源的发展。同时，随着电力市场改革的深化，综合能源系统能够整合能源侧与需求侧资源，直接参与电力市场交易^[30]。

(3) 能源互联网

能源互联网的出现，是基于能源清洁低碳、可持续发展与互联网信息技术飞速发展的背景，是新能源技术与互联网技术深度融合，具有开放互联、对等共享、以用户为中心和分布式的特点^[31]。能源互联网的意义主要有三个方面，①实现多类能源互联互通与资源整合，有效提高能源利用效率，促进能源利用方式从粗放型向集约型转变^[32]，实现大规模清洁能源替代^[33]，实现资源优化配置；②紧密对接能源数据信息与用户需求，最大程度利用新能源^[34]，有效促进新能源消纳^[35]；③是中国解决高耗能高污染等问题^[36]、构建清洁低碳、安全高效的能源体系的重要途径。虽然能源互联网的概念尚未具有统一的标准定义，但能源互联网的核心价值已获得了学者们的广泛认同。

在电力绿色发展过程中，清洁能源逐步取代一次性能源，地位不断提升。随着新能源并网规模不断扩大，新能源发电功率的间歇性、波动性和反调峰特性以及我国资源与负荷中心逆向分布等原因，出现“弃风、弃光”现象^[37-38]，且电力系统运行不确定性显著增加^[39]。在我国当前仍以火力发电为主导的背景下，构建火电与新能源联合的能源协同，打破火电与新能源间的壁垒，激励火电最大限度发挥自身作用，促进新能源消纳，加深我国电力绿色化程度，成为亟待解决的问题。有关学者已经进行了大量有意义的研究，除三种典型多能源协同模式外，因地制宜，采用火力发电与多类清洁能源、储能联合模式，以提升电力系统经济性，减少化石能源消耗。一些研究充分发挥多类能源之间的互补特性，提出相应的多能源联合模式。文献[40]指出未来可建立抽水蓄能电站或独立大型水电站参与的水-火-风/光联合运行的调峰调频模式，充分发挥了梯级水电在调峰和调频上的灵活性优势，缓解火电调峰压力^[41]，提高电力系统运行的经济性。在此基础上，为充分利用不同能源间的互补特性，风-光-火-储、风-光-水-气-火-储等复杂多元并存的能源联合模式被提出^[42-43]，能够在广域时空中充分发挥电源的互补特性，提升电力系统的灵活性，增强可再生能源的消纳能力。除风、光外，未来核电将作为可大规模替代化石能源的清洁、可靠的发电形式，在电网的比重逐步增大^[44-45]。核电机组因其固有特性不适合单独承担调峰任务，需与响应速度较快的机组联合运行才能较好的满足电力系统调峰需求^[46-47]。为了提高核电运行的安全性和灵活性，可选择核-火、核-蓄联合调峰策略^[48]、核-火-抽水蓄能联合调峰策略、及核-火-虚拟电厂联合调峰策略等调峰方式^[49]，增加虚拟电厂的调峰策略，能够有效平抑等效负荷预测误差，降低系统的发电成本与碳排放量。

4. 促进中国电力绿色发展的对策建议

为解决我国弃风弃光现象，促进新能源消纳，优化电源结构，助力电力绿色发展，可考虑采取以下多方面措施。

(1) 加强绿色电力技术创新与运营管理研究，保障高比例可再生电网稳定运行

建立健全绿色电力发展的技术创新体系，突破不稳定新能源上网瓶颈。如果实现高比例可再生能源并网，可突破新能源转化困境，促进大量新能源消纳。中国电力系统将在较长时间

内, 呈现高比例可再生能源和交直流混联电网特征。亟待研究基于大规模可再生能源接入电网的协同优化运行方法、电网侧储能技术方法、电力系统供给侧多种能源复杂综合调度实时优化方案, 通过技术创新和管理创新提升绿色电力运行管理水平, 保障电网稳定运行。

(2) 加强研究含新能源的复杂电网短期负荷预测与功率预测的建模方法

提高含新能源的电网短期电力负荷预测精度, 对于机组最优组合、发电与停机计划调度以及电网实时安全有着重要意义, 能够有效提高发电设备利用效率和经济调度的有效性, 有利于电力部门掌握需求变化情况。同时, 准确预测短期电力负荷, 能够加速富裕可再生能源跨省区消纳的现货市场, 促进新能源消纳。

(3) 加强对抽水蓄能电站、市场化运营等调峰理论方法的研究

核机组与承担基础负荷的火电机组较少参与系统调节, 凝汽燃煤机组和供热火电机组调峰性能较差, 而抽水蓄能可以快速启停、大幅调节。作为调峰电源配置, 抽水蓄能电站的灵活调峰调频。需与可再生能源一起进行总体规划, 设计合理的调峰机制。应采取市场化手段达到实现调峰调频目的, 以电源可靠性、负荷可预测性为前提, 设计区域间联合发电计划, 采用省间电能置换措施, 促进可再生能源消纳。

(4) 打破省间壁垒, 建立统一的电力市场

新能源消纳是一个长期性、阶段性的系统工程, 需要凝聚多方力量, 要求政府部门、电网企业、发电企业和用户共同努力。需加强顶层设计, 在国家层面实现电力在全国范围统一规划和平衡; 推动市场机制建设, 加快构建公平竞争、健康有序的全国统一电力市场; 规划建设一批跨区输电工程, 加强送端、受端电网建设, 发挥好电网优化配置资源的平台作用; 加强对基于清洁低碳的电力多品种交易方式机制的研究; 加强对区域间联合发电运行机制的研究; 加强对电能辅助服务补偿机制的研究。

参考文献

- [1] Qu H, Huang X, Xu T, et al. The Analysis of Current Implementation Mechanism of Green Power[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 860-863: 784-790.
- [2] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 11-24.
- [3] 王文举, 陈真玲. 改革开放 40 年能源产业发展的阶段性特征及其战略选择[J]. *改革*, 2018(9): 55-65.
- [4] 国务院关于印发“十三五”控制温室气体排放工作方案的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/04/content_5128619.htm.
- [5] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [6] Havva B. Contribution of green energy sources to electrical power production of Turkey: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12: 1652-1666.
- [7] Zhang C, Zhou J, Li C, et al. A compound structure of ELM based on feature selection and parameter optimization using hybrid backtracking search algorithm for wind speed forecasting[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 143:360-376.
- [8] 中国电力企业联合会. 《中国电力行业年度发展报告 2019》.
- [9] 施应玲, 左艺, 孟雅儒. 中国火电产业的历史轨迹与发展展望[J]. *科技管理研究*, 2017, 37(16): 136-145.
- [10] 国家统计局. 中华人民共和国 2019 年国民经济和社会发展统计公报, 2020-2-28.
- [11] Niu D, Wang K, Wu J, et al. Can China achieve its 2030 carbon emissions commitment? Scenario analysis

- based on an improved general regression neural network[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 243, 1-14.
- [12] BP 能源统计年鉴 2019.
- [13] 李志学, 吴硕锋, 雷理钊. 我国新能源产业价格补贴政策现状、问题与对策分析[J]. 价格月刊, 2018(12): 1-7.
- [14] Lund H, Werner S, Wiltshire R, et al. 4th generation district heating(4GDH):integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems[J]. Energy, 2014, 68(4): 1-11.
- [15] 国家发展改革委, 国家能源局, 工业和信息化部. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见 [EB/OL].(2016-02-2)[2018-05-08].http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm.
- [16] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网:理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19):1-8.
- [17] Bao Z, Zhou Q, Yang Z, et al. A Multi Time-Scale and Multi Energy-Type Coordinated Microgrid Scheduling Solution-Part I: Model and Methodology[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2257-2266.
- [18] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7.
- [19] 刘晓明, 牛新生, 王佰淮, 等. 能源互联网综述研究[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 24-33 .
- [20] 丁涛, 牟晨璐, 别朝红, 等. 能源互联网及其优化运行研究现状综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4318-4328+4632.
- [21] 邢通, 谭清坤, 王尧, 等. 我国能源系统演化发展模式研究[J]. 价格理论与实践, 2019(11): 154-157 .
- [22] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于推进多能互补集成优化示范工程建设的实施意见 [EB/OL][2016-07-07] http://www.nea.gov.cn/2016-07/07/c_135496039.htm.
- [23] 林凯骏, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于非合作博弈的冷热电联供微能源网运行策略优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 25-32 .
- [24] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18+369.
- [25] 刘迎澍, 陈曦, 李斌, 等. 多微网系统关键技术综述[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3804-3820.
- [26] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697-1708.
- [27] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 3-10.
- [28] 贾宏杰, 穆云飞, 余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设, 2015, 36(12): 16-25.
- [29] Parag Y, Sovacool K. Electricity market design for the prosumer era[J]. Nature Energy, 2016, 1(4):16032.
- [30] 周琳, 付学谦, 刘硕, 等. 促进新能源消纳的综合能源系统日前市场出清优化[J]. 中国电力, 2019, 52(11): 9-18.
- [31] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19):1-8.
- [32] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
- [33] 杨锦春, 刘慧. 能源互联网的资源配置效应研究[J]. 技术经济与管理研究, 2020(1): 109-113.
- [34] 姚建国, 高志远, 杨胜春. 能源互联网的认识和展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 9 - 14.
- [35] 周孝信, 曾嵘, 高峰, 等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 42(2): 149-170.
- [36] 万灿, 贾妍博, 李彪, 宋永华. 城镇能源互联网能源交易模式和用户响应研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 29-40.
- [37] 张正陵. 中国“十三五”新能源并网消纳形势、对策研究及多情景运行模拟分析[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 2-9.
- [38] 刘吉臻, 曾德良, 田亮, 等. 新能源电力消纳与燃煤电厂弹性运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5385-5394.
- [39] 于东, 孙欣, 高丙团, 等. 考虑风电不确定出力的风电并网协调优化模型[J]. 电工技术学报, 2016,

- 31(9): 34-41.
- [40] 葛晓琳, 金言, 夏澍, 等. 面向调峰调频需求的风水火电协调优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3917-3926.
- [41] 田雨雨, 畅建霞, 王学斌, 王义民. 面向光伏消纳的水-火-光联合优化调度技术[J]. 可再生能源, 2020, 38(1): 91-97.
- [42] 甘伟, 艾小猛, 方家琨, 等. 风-火-水-储-气联合优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊(1)): 11-20.
- [43] 李志伟, 赵书强, 刘金山. 基于机会约束目标规划的风-光-水-气-火-储联合优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 214-223.
- [44] 叶奇蓁. 后福岛时期我国核电的发展[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(11): 1-8.
- [45] 马习朋. 探讨大型压水堆核机组参与电网中间负荷调峰[J]. 现代电力, 2007, 24(4): 28-33.
- [46] 常烨骀, 刘娆, 王冲, 等. 核电参与三次调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 71-76.
- [47] Dong Z, Feng JT, Huang XJ. Nonlinear observer-based feedback dissipation load-following control for nuclear reactors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(1): 272-285.
- [48] 赵洁, 刘涤尘, 雷庆生, 等. 核机组参与电网调峰及与抽水蓄能电站联合运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 1-6.
- [49] 李旭东, 艾欣, 胡俊杰, 周泊宇, 林章岁. 计及碳交易机制的核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2460-2470.

Research on the problems and countermeasures in the green development of Electric power in China

Niu Dongxiao¹, Wang Keke¹, Yu Min¹

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing, 102206)

Abstract: Electric power industry is an important basic industry for national economic and social development, and it plays a core role in the energy system. Green development of electric power industry is the key to ease energy shortage, adjust energy structure, reduce environmental pollution and improve energy efficiency. Based on the analysis of the current situation of China's electric power green development, this paper focuses on the problems faced by China's electric power green development. On this basis, taking the multi-energy synergy mode as a typical research object, this paper expounds the critical research points of China's electric power green development, summarizes the key scientific problems faced by China's electric power green development, and puts forward some targeted countermeasures and suggestions for electric power green development suggestions.

Keywords: power industry; green development; new energy; multi-energy synergy mode

基金项目: 教育部哲学社会科学重大课题攻关项目:《构建清洁低碳、安全高效的能源体系政策与机制研究》(编号:18JZD032)

作者简介(可选): 牛东晓(1962-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:能源管理与政策分析、电力技术经济预测与评价、电力市场管理;王珂珂(1994-),女,博士研究生,主要研究方向:能源管理、电力市场管理