

双碳目标条件下新型电力系统发展路径及 电网建设分析

范清亮¹ 刘甲明¹ 黄平²

(1. 国能(海南)新能源发展有限公司 2. 清华海峡研究院(厦门))

摘要：当前世界上各主要大国均提出了碳达峰、碳中和目标。我国为了顺应目前的国际经济低碳发展的大趋势，为了向地球环境贡献中国力量，提出了2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的目标，这一目标展现了我国经济低碳转型的决心和信心。随着我国“碳达峰、碳中和”目标的提出，下一阶段电力系统将面临“双碳”目标的挑战和机遇。本文首先研究了双碳目标的内涵，提出了一种电力系统“双碳”目标实现路径的研究框架，最后，结合电力系统的发展特点，给出了电力系统的碳达峰、碳中和路径。

关键词：碳达峰；碳中和；电力系统；低碳发展路径

0 引言

碳达峰、碳中和目标的提出，不仅为全球低碳发展奠定了良好基调，更是对国内经济发展特别是能源行业的发展提出挑战。在“双循环”战略下，积极发展低碳经济产业成为拉动经济的新动能。能源变革大趋势下，电力系统作为能源行业的重中之重，低碳转型的速率和效果将决定能源行业是否能实现碳达峰、碳中和的目标。

电力系统是一种重要的基础设施^[1-7]，能源互联网建设^[8-15]是下一代电力系统的主要形态，也是电力系统中作为主体的电网企业的企业战略。能源互联网是以电为中心，以坚强智能电网为基础平台，将先进信息技术、控制技术与先进能源技术深度融合应用，支撑能源电力清洁低碳转型和多元主体灵活便捷接入的智慧能源系统。

作为能源工业的主体之一，电力系统的发展是否满足国家低碳经济发展的战略，显得十分重要，电力系统的发展路径对于“碳达峰”、“碳中和”作用明显，因此有必要开展“双碳”目标下的电力系统“碳达峰”、“碳中和”路径研究。

1 “双碳”的提出

1.1 “双碳”目标的内涵

碳是自然界非常常见的元素，是组成生命的基本元素，在自然界以有机物和非无机物出现。其与氧元素组成的二氧化碳是温室气体的主要组成部分，是导致气候变暖甚至海平面上升的罪魁祸首。“双碳”目标即“碳中和”及“碳达峰”，意指指为控制人类即将面临的气候变暖带来的严重气候灾害，在发展经济时主动降低碳排放，通过控制温室气体排放控制气候

变暖。

IPCC 发布的《全球 1.5℃ 温升特别报告》提出国际长期目标是将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在 2℃ 以内，并努力将温度上升幅度限制在 1.5℃ 以内^[16-18]。《巴黎协定》中第四条提出要在 21 世纪下半叶，在温室气体源的人为排放与汇的清除量之间取得平衡，这一目标对应于净零排放。《巴黎协定》之后，陆续有国家和地区提出了与中和及净零排放有关的长期目标。在 2019 年联合国气候行动峰会中，联合国秘书长古特雷斯发表声明称包括 65 个缔约方在内的“2050”集团全数承诺在 2050 年前实现碳中和。

文献 [16] 指出，以欧盟为代表的欧洲发达国家普遍提出以 2050 年为目标年，而芬兰、冰岛等北欧国家在碳中和行动中表现更为突出，把目标年提前到 2035~2040 年。发展中国家中的小岛屿国家以及最不发达国家，如斐济、马绍尔群岛等的目标年也集中在 2050 年。相比之下，新加坡从自身减排成本等角度出发提出了到 21 世纪下半叶实现碳中和的目标。

2020 年 9 月 22 日，在第 75 届联合国大会一般性辩论上，习近平总书记代表中国向全世界宣布将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。为了实现“碳中和”，需首先实现“碳达峰”。“双碳”目标的实现，需要电力系统共同推动低碳转型，而这将是一场正在发生的能源革命。

1.2 “双碳”目标实现的现实条件

目前，我国仍是煤炭使用的大国，煤炭发电量占比达到 70% 以上，CO₂ 排放量占世界排放的三分之一。经济发展阶段方面，我国仍处在发展前期，相对发达国家而言能源使用量呈现不断增加的趋势。在用能需求和“双碳”目标的矛盾下，能源行业能否实现能源结构转型十分关键。

1.3 “双碳”目标下的发展机遇

十九大报告提出了“推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系”，使得电力系统的发展方向更加明确，就是低碳清洁发展。电力系统的清洁能源将迎来新的发展机遇期。在国家战略的支持下，迅速发展清洁能源为主要能源的电力系统成为现实需要。

通过源源互补、源网协调、网荷互动、网储互动和源荷互动等多种交互形式，更经济、高效和安全地提高电力系统功率动态平衡能力，本质上是一种实现能源资源最大化利用的运行模式和技术。

该阶段火电开发增速趋缓，与碳捕集、碳封存技术的发展相适应开发；新基建下电网配套新能源基地大规模开发，开发进入增速期，坚强智能电网不断完善；负荷侧管理进一步加强，能源利用效率不断提高，配网侧用能友好程度不断提高；储能快速发展，进入大规模开发时期。系统建设低碳化，设备碳排放方面，通过技术手段更换高耗能、高排放设备（如六氟化硫断路器），减低设备、基建施工的碳排放。

系统管理低碳化，加强实物资产管理水平，查找碳排放重点环节，制定策略节能减排，推行无纸化办公，倡导低碳管理。

系统运维低碳化，加强线损管理，降低输电损耗，开发高比例新能源接入的调控系统，适应新能源快速、大量接入。

设计低碳化，规划设计阶段，充分考虑系统的低碳发展，设置降碳措施。

市场建设达到一定的水平，使用价格手段使新能源利用率逐步提高，应用价格手段，管制碳排放，促使电力系统节能减排。

“碳中和”是一种远景发展路径，通过电力系统的不断低碳化发展实现，分为中期路径和远景路径。

随着能源互联网建设的不断发展，至低碳发展中

期，随着全国市场机制的建立与完善，“大云物智移链”技术与电网运行不断融合。

2 电网网架建设

电网工程在我国发展迅速^[19-23]，据统计，截至2020年，我国共有25条在运电网线路、7条在建电网线路以及7条待核准电网线路。“十三五”期间，我国包括电网工程在内的电网工程规划总投资2.38万亿元，带动电源投资3万亿元，年均拉动GDP增长超过0.8%。

当前随着我国进入经济新常态，并实施国内国外双循环，新基建等经济活动成为现阶段的重点建设

内容，其中就包括以电网输变电工程为代表的电网工程。电网输变电工程是目前电压等级最高，工程规模较一般工程大且具有较为重大的建设意义的电网工程，其创新较大。

随着“双碳”目标的正式提出，我国大多数央企都予以了高度重视，并出台了行动方案。

后评价方法经过一系列投产工程的后评价工作实际摸索，已经较为完善，形成了一套方法体系，如图1所示。主要是根据国家、行业、企业等一系列的后评价标准、导则，形成的评价条文、框架。一般来说，后评价是对投资、建设项目开展的回顾分析活动。后评价过程如图2所示。

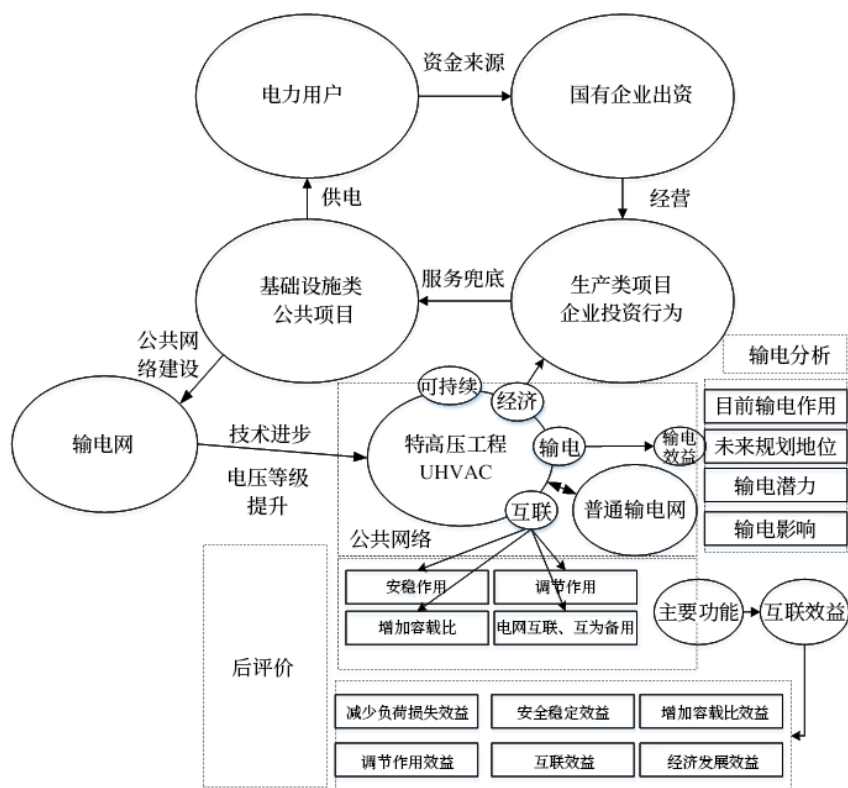


图1 电网工程后评价框架

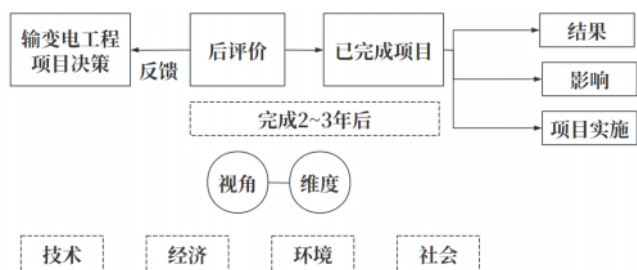


图2 输变电工程后评价过程

输变电工程后评价是电网基建管理的重要内容，对于电网发展具有重要作用，在电网领域，目前学术界的探索还较少，因此有必要开展新的研究。文献[24]对电网施工管理开展了后评价研究，但并未探讨系统方面的效益问题；文献[25]研究了电网工程的效益问题，但主要是从统计角度开展分析，较少从系统分析角度开展研究；文献[26]研究了直流电网工程的后评价问题，没有对交流工程做探讨。在交流工程数量日益增多，作用日益增大的情况下，有必要专门开展交流工程的后评价研究，特别是系统效益^[27-31]的研究。

电网基建的全过程包括投入资金、建设、运营、退役，其中运营期的利润需要覆盖一次性的基建投入，并且由于考虑资金的时间价值，需要实现8%的内部收益率。

3 电网交流系统的系统后评价

交流工程的效益评价一直是一个难点。交流工程一般需要成网运行，单独的输变电工程在电网中的作用本来就难以定量评价，因为单一线路总是要在网络中发挥作用，交流工程是电网灵活调度的物质基础。交流输电资产的有效利用可以减少事故损失和获得先进输电技术效益，包括错峰降低运行高峰成本等，获得绿色减排效益^[32-39]，带动GDP发展等。

4 “双碳”目标下电网交流系统的系统效益评价

“双碳”目标下，电网将接纳更多的非化石能源，清洁能源迎来大发展时期。电网交流工程的效益分为输电效益和联网效益。从已开展过后评价的电网交流工程来看，建设效益主要对应于建设目标来说，包括输电效益、系统效益，其中输电效益包括：①满足社会近期、中期、远期用电需要；②为三北大风电、大光伏发电基地找寻用电负荷，帮助清洁消纳，提高三北地区清洁能源利用，提升系统本身的环保水平；③提高大电网系统的在大规模功率缺额发生时的潮流调度能力，历史证明当电网直流发生闭锁时，电网交流线路可以有效组织补充系统功率。

从工程角度来说，电网交流工程具有两大效益。一是系统运行中，支撑潮流调度的系统效益，包括对互联电网的可靠性、安全性、灵活性的支撑。二是大容量输电输送电能产生的输电效益，此处的输电效益应包括不同区域电价的落差产生的市场交易效益，以及输送电能代替输送煤炭的节约运力的效益，输电走廊节约效益等。

电力系统效益评价主要集中于对电源规划、抽水蓄能^[40]、园区多能互补调度^[30]等方面，较少关注新近出现的电网电力系统的效益评价研究。部分文献对系统的联网效益做了研究，文献[41]指出联网效益包括错峰效益、采用大机组的效益、施行水电火电相互调剂的效益、机组经济运行的效益、大规模停电时的黑启动效益，节约机组建设的效益等。

电网交流工程的系统效益可以初步分为错峰效益、采用大机组的效益、水火互济效益、错峰运行效益、互供备用效益、事故支援效益、黑启动效益七大类。由文献[37]可知电网交流工程除以上交流工程共通的联网效益外，还可以包括满足远期负荷需求效益、提高清洁能源消纳效益、抵御灾害效益、提高安全控制效益、促进电力市场效益五类，一共十一类。电力系统是逐渐提高电压等级、联网范围逐步扩大、

资源分布范围逐步扩大的，因此电网互联一度成为电网发展的大方向。

5 电网交流系统的拓扑分析

5.1 电网交流系统的基本拓扑结构

目前，电网交流系统的拓扑结构一般为单辐射链式网络，逐渐在形成成型的网络结构。未来电网交流系统将越来越完善，其平台作用将充分显现。

关键路径：

以十字形拓扑为例，说明电网交流工程的定点下网作用，如图 3 所示。根据递归定律计算十字形拓扑的组合方式共有 15 种，但如果建设电网直流工程则为 1 种点对点输电方式，可知，电网交流工程作为电力物流网络的潜力要大很多。

$$P = \frac{n(n-1)}{2} \quad (1)$$

以某实际电网交流工程拓扑为例，通过在西部一次资源丰富的地区建设电网交流站，通过电网线路转送至中部省份，通过中部省份的相交线路转送至三个区域。同时，中部地区的三个省份通过交流工程的双向流动能力实现电力互补、平衡。此时可以实现的实际输电组合方式为 8 种，能够充分实现不同地区的电力交换。

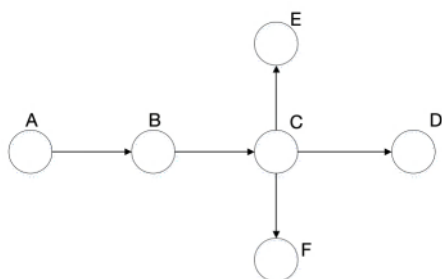


图 3 电网交流工程的拓扑结构图

5.2 案例拓扑结构下实际工程分析

以某电网交流工程为例，说明上述拓扑结构图的

实际意义，如图 4 所示。图中圆形表示电网变电站，箭头联接的地方为输电线路。图中左侧为两个一次能源富集的西部大省，可以将价格低廉的一次能源在坑口转化为电力送上电网交流工程，通过输电线路送至中部省份中转。由于我国从西往东是负荷不断集中的趋势，因此在中部省份可以实现价格低廉的电力集散。

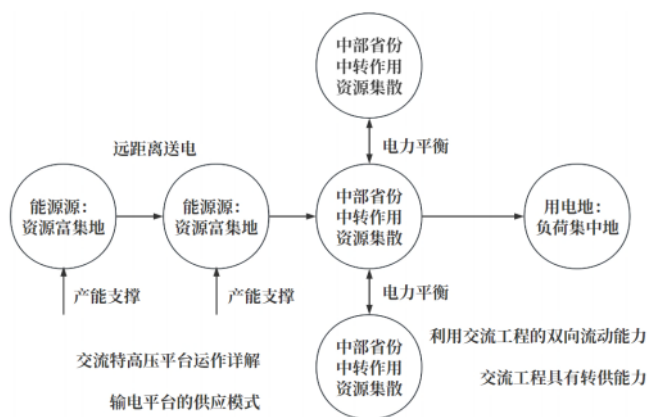


图 4 电网交流工程实际输电意义

中部省份的链结，起到系统支撑的作用，由于系统一般所处的区域负荷集中程度与电网强度成正比，所以电力是逐级流动至负荷中心，经过中部的缓冲区，对负荷中心的高安全性负荷起到了保护作用。通过中部省份的系统互相支持，输送稳定的电力至左右侧的负荷中心。

5.3 电网交流系统拓扑结构的输电平台作用

电网交流系统的平台作用最为基础的是输电平台。理想条件下，电网交流输电可以实现大容量、远距离输电，具有较强的输电效益和系统效益，一般情况下，电网交流工程的拓扑结构是一个链式网络，即将工程两端通过 1000kV 电网交流变电站串联起来。是一个跨省输变电平台，通过定点下网，高效地将电能从一次资源富集地联接负荷中心。

6 结束语

经过分析,实现“双碳”目标,任务虽然艰巨,但电力系统已有一定的技术积累,相关技术需要大规模应用和进一步提升技术水平。促进能源转型和“大云物智移链”的应用是主要途径。

参考文献

- [1] 辛保安.为实现“碳达峰 碳中和”目标贡献智慧和力量[N].中国电力报,2021-02-24(001).
- [2] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904,2205.
- [3] 周孝信.能源转型中我国新一代电力系统技术发展趋势[J].电气时代,2018(1):33-35.
- [4] 梅生伟.电力系统的伟大成就及发展趋势[J].科学通报,2020,65(6):442-452.
- [5] 陈来军,梅生伟,许寅,等.未来电网中的独立电力系统模式[J].电力科学与技术学报,2011,26(4):30-36.
- [6] 梅生伟,龚媛,刘锋.三代电网演化模型及特性分析[J].中国电机工程学报,2014,34(7):1003-1012.
- [7] 卢强,梅生伟.面向21世纪的电力系统重大基础研究[J].自然科学进展,2000(10):8-14.
- [8] 田世明,栾文鹏,张东霞,等.能源互联网技术形态与关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.
- [9] 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.
- [10] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等.能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J].电网技术,2016,40(1):114-124.
- [11] 白建华,辛颂旭,刘俊,等.中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3699-3705.
- [12] 马钊,周孝信,尚宇炜,等.能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J].电网技术,2015,39(11):3014-3022.
- [13] 曹军威,孟坤,王继业,等.能源互联网与能源路由器[J].中国科学:信息科学,2014,44(6):714-727.
- [14] 曾鸣,杨雍琦,李源非,等.能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J].中国电机工程学报,2016,36(3):681-691.
- [15] 王继业,孟坤,曹军威,等.能源互联网信息技术研究综述[J].计算机研究与发展,2015,52(5):1109-1126.
- [16] 张雅欣,罗荟霖,王灿.碳中和行动的国际趋势分析[J].气候变化研究进展,2021,17(1):88-97.
- [17] 胡鞍钢.中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J].北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(3):1-15.
- [18] 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/OL].北京理工大学学报(社会科学版):1-10[2021-02-24].
- [19] 王若云,刘柏私,伍凌云,等.大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J].大众标准化,2024(12):31-33.
- [20] 饶宏,张东辉,赵晓斌,等.电网直流输电的实践和分析[J].高电压技术,2015,41(8):2481-2488.
- [21] 李少华,王秀丽,张望,等.电网直流分层接入

- 交流电网方式下直流控制系统设计 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (10): 2409-2416.
- [22] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (4): 257-264.
- [23] 程春田, 励刚, 程雄, 等. 大规模特高压直流水电消纳问题及应用实践 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (3): 549-560.
- [24] 张涛. 特高压输电线路工程施工管理后评价研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2019.
- [25] 尚国伟. 特高压输电工程的效益后评价指标体系构建 [J]. 统计与管理, 2014 (10): 144-145.
- [26] 周超. 宁东—山东 $\pm 660\text{kV}$ 直流输电示范工程项目后评价研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [27] 杨杰. 能源产业链运输系统效益提升框架与关键技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [28] 辛禾. 考虑多能互补的清洁能源协同优化调度及效益均衡研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [29] 贾凡. 移动边缘计算网络中基于系统效益优化的资源分配算法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [30] 韩中合, 祁超, 向鹏, 等. 分布式能源系统效益分析及综合评价 [J]. 热力发电, 2018, 47 (2): 31-36.
- [31] 李龙锡. 楼宇及区域型分布式能源系统效益评价研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [32] 赵国涛, 钱国明, 王盛. “双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析 [J]. 华电技术, 2021, 43 (6): 11-20.
- [33] 黄轶康, 许海清, 程亮, 等. 绿色输变电工程施工期环境评价指标量化研究 [J]. 价值工程, 2020, 39 (21): 46-47.
- [34] 宋宗耘. 大气污染防治背景下的电力需求侧管理优化研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [35] 蒋雨. 海南电力绿色发展评价方法与系统研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- [36] 张晓辉. 含风电的电力系统动态经济调度研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [37] 王伟. 绿色电网发展理论与实证研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [38] 张徐东. 低碳背景下电力系统规划与运营模式及决策方法研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [39] 房芳. 基于绿色经济的风火电联合运营规划及效益评价研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [40] 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.
- [41] 穆永铮, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于多算子层次分析模糊评价的电网安全与效益综合评价指标体系 [J]. 电网技术, 2015, 39 (1): 23-28.

(收稿日期: 2024-05-20)