



# 能源革命下的电力系统范式转换分析

周勤勇, 李根兆, 秦晓辉, 施浩波, 陈文静, 龚浩岳

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 科学革命的本质是范式转换, 将此基本科学哲学观点应用于能源革命, “碳达峰、碳中和”目标下, 能源革命的本质是发展范式的转换, 即由从低能量密度向高能量密度转型升级的范式, 由低环保向高环保的能源利用范式转换。在能源发展范式转换下, 传统电力系统将逐渐呈现高比例新能源电力系统特征, 系统面临经济性、安全稳定水平、充裕度下降, 发展空间受限等危机, 且原有电源集约化、电网等级高压化、同步电网扩大化规则构成的规模化发展范式无法化解危机。原有范式失效, 规则逐渐松弛, 分布式电源、微电网、大容量储能等发展要素驱动下的技术创新模式的转变将会引导建立新的发展范式, 新的发展范式下建立的电力系统即为新型电力系统。

**关键词:** 科学革命; 范式转换; 新能源; 新型电力系统

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202311115

## 0 引言

2020 年中国二氧化碳排放总量约 110 亿 t, 而能源燃烧的二氧化碳排放约为 98 亿 t, 其中电力行业煤电排放约 39 亿 t, 约占二氧化碳总排放量的 1/3。能源革命是实现“碳达峰、碳中和”的关键, 电力行业的转型是实现能源革命的关键环节。

根据目前对承载新能源能力、系统低碳化发展趋势下的挑战和风险预判<sup>[1-2]</sup>, 电力系统的物理结构、市场机制、技术创新体系等都面临变革。目前, 行业内主要聚焦于高比例新能源电力系统, 对电力系统的演化和未来形态结构进行了研究。文献[3]基于社会-技术系统理论, 对中国电力系统演化路径历史进行了分析, 并判断了宏观体制和微观技术对电力系统演化的影响; 文献[4-5]通过建立电力系统形态演化的综合模型, 提出对未来电力系统结构形态的判断; 文献[6]采用 GESP-V 软件包进行优化分析, 确定不同情景下的电力低碳转型路径; 文献[7]根据当前及未来电力系统发展面临的主要问题和关键因素分析, 提出了新一代电力系统的主要技术特征。

上述文献主要从电力系统发展本身, 以新能源大规模发展为背景, 进行了理论、模型和结构

形态的探讨。在一个行业的转型初期, 从宏观的视角引导思维的突破、技术的创新比仅从行业内部来讨论具体技术, 更具有指导意义和价值。美国著名科学哲学家托马斯·库恩提出的范式及其转换理论逐渐成为各行业转型分析的基础理论, 经济学把它作为改革目标转换模式的理论依据; 历史学家用它来解释朝代的变更; 科学史家用来探讨“李约瑟难题”: 为什么近代科学没有在中国产生? [8]。

面对能源转型, 文献[9]从问题、目标和方法切入, 提出了全球能源治理的范式转换; 文献[10]针对能源转型的特点, 提出了新的研究范式。上述文献引入范式概念从而对管理、研究路径转化进行了探索, 但都没有从能源、电力本身去证明其是否符合范式转换的基本特征。本文引入科学革命的本质是范式转换的基本理论, 在能源革命背景下, 从电力发展本身及其导致的技术、经济成效分析电力系统转型是否符合范式转换, 即原发展范式、危机与反常、新范式建立的过程, 在此基础上探索电力系统范式转换的目标和新范式的内容, 力图从宏观上建立电力系统范式转换结果便是新型电力系统的基本结论, 引导科技创新为主的新发展范式思维的建立, 避免对过去规模为主的旧范式的依赖, 快速推进新型电力系统的发展。

收稿日期: 2023-11-22; 修回日期: 2024-02-06。



## 1 范式转换基本定义及应用

### 1.1 范式的基本定义

范式 (paradigm) 一词最早出现在亚里士多德的《修辞学》，其最初定义为“一种最好的、最具指导性的例子”，而后逐渐发展，脱离了语言学的范畴，用于“描述被遵循或被模仿的标准模型”。

1962 年，美国著名科学哲学家托马斯·库恩 (Thomas Kuhn) 赋予了“范式”一词以“现代含义”，在其代表作《科学革命的结构》<sup>[11]</sup> 定义了“科学 (研究) 范式”，其具体是指“为共同体所接受的科学实践 (包括定律、理论、应用、试验和仪器) 的例子，提供给科学研究者一种一贯的传统，并被当作由此构成科学共同体第一要素的承诺”。这个概念的提出对科学史、科学哲学乃至一般哲学的研究产生了深远的影响。

### 1.2 范式转换及科学革命

常规科学范式规定了共同体 (从事一个学科研究，甚至一个更小的共同专题研究的团体) 所研究的谜题和问题，并产生成果，直到范式规定的方法不能应付越来越多的反常现象，科学研究危机爆发，并持续到一项新的科学成就产生，重新指导研究，再逐渐被 (可能是新的) 共同体认同为新一代的范式，这就是“范式转换”。库恩指出：科学革命的实质就是范式转换。

库恩同时也指出，科学革命起源于科学共同体中一小部分逐渐感觉到现有范式的失效，这不仅适用于解释哥白尼天文学革命和拉西瓦化学革命那样重大的范式转换，同样也适用于诸如发现氧气和 X 射线等只涉及发现一个新现象的范式转换。

### 1.3 范式转换理论的应用

范式的提出源自科学革命的结构研究，因此范式转换也最先被用来梳理科技革命史。根据库恩的定义，学者们对科学技术历史进行了梳理，并大致归纳了 3 次范式转换。第 1 次是以伽利略、牛顿等科学家为代表的实验科学 (如著名的伽利略比萨斜塔实验) 范式替代经验总结范式，诞生了近代物理学；第 2 次是以爱因斯坦等为代表的理论推导范式替代了纯实验范式，产生了对论和量子力学，从而奠定了近代科学的基础；

第 3 次是计算成为科学研究的新范式，从而进入了信息时代。虽然上述划分并没有在学术界取得公认，但仍具有较高的指导价值。

作为一种分析方法，范式转换的概念广泛应用于社会学、管理学、生态学等领域<sup>[12-14]</sup>。文献 [15] 研究指出，一些复杂系统存在指数级增长的规律，如社会系统，其经济指标 (如人口数量或 GDP) 在指数级增长规律下，会在短时间内对能源造成极大的需求，在一个封闭系统中，如果不实施范式转移 (如摆脱对化石能源的依赖)，最后将导致系统崩溃。社会经济之所以没有崩溃，就是利用了煤炭工业、电话和计算机等“范式转换”。

由于库恩本人在《科学革命的结构》中对于范式一词有多达 21 种用法，导致对范式理解不一，很多研究和论文对范式的引用过滥且不严肃，不符合范式基本定义。英国学者玛格丽特·玛斯特曼 (Margaret Masterman) 将库恩的范式概念模型概括为 3 种类型<sup>[16]</sup>：一是作为一种信念、一种形而上学思辨，它是哲学范式或元范式；二是作为一种科学习惯、一种学术传统、一个具体的科学成就，它是社会学范式；三是作为一种依靠本身成功示范的工具、一个解疑难的方法、一个用来类比的图像，它是人工范式或构造范式。通常讨论和运用的是范式的后两种含义。本文也是根据第 3 种定义来开展分析工作。

另外，需要说明的是，库恩的范式及其转换的提出，是对科学研究史的一次总结和哲学提炼，哲学观点一旦被认可，就可用来对未来态进行研判，这也是本文想要达到的目的，但由于诞生语境迁移适应需要过程，往往也会存在机理逻辑不严谨的问题。

## 2 能源革命及范式转换

人类利用能源的历史和人类的发展史几乎是同步的。文献 [17] 指出，人类在过去的 200 年里经历了 2 次大的能源转型，分别是 19 世纪中期开始的从木柴到煤炭的转型，以及 20 世纪初期开始的从煤炭到石油天然气的转型。

上述过程，一般称之为能源转型，其基本意义是主能源的切换是跟随型的，譬如第一次工业



革命带来的机械化，必然是要求能量密度更高的、易挖掘的能源来替代木柴；第二次能源转型是内燃机的发明，需要更易携带、更高能量密度的能源利用形式。2次转型没有上升为能源革命，按照革命即是范式转换的基本定义，也可以认为没有产生范式转换过程，即2次转换都遵循了同一个能源发展范式。这个范式可以认为是从低能量密度向高能量密度转型升级（经济性随之提升）。如果沿用该范式，下一次能源转型应该开发比石油、天然气能量密度更高的能源，核能利用是理想的能源。核能的利用主要聚焦于核裂变技术和核聚变技术，核裂变技术主要受制于安全性要求和小型化技术约束，而核聚变技术距离工业化应用还有很远的距离，目前来看，都很难作为未来主要依托能源<sup>[18]</sup>。

如果不改变现有能源发展范式，人类发展不断加速，对生态环境造成的影响将不断加剧。地球大气二氧化碳的浓度从1958年的313  $\mu\text{L/L}$ 上升到2023年超过420  $\mu\text{L/L}$ ，科学研究结果表明，二氧化碳浓度的提升将对地球和人类造成灾难性后果<sup>[18]</sup>。电力行业作为二氧化碳排放的主要源头，在核能不能作为第三次能源转型目标的前提下，具有范式转换内涵的能源革命具有必然性。

清洁能源利用模式包括水能、风能、光能的开发，由于水能开发形式以水电为主，而且资源相对有限，未来还是以风能、光能的利用为主，且主要是用作发电，实现对化石能源发电的替换。风能、光能的发电利用早已开始，并且逐渐成为未来能源利用方式的主流。新能源发电的利用破坏了原有能源密度从低到高的传统范式（从前端原料供给来看，其可靠性也降低），但同时也将建立了环境友好度从低到高的新范式。

要实现一次能源发展的范式转换，经历时间会比前两次能源转型更长，图1展示了能源快速转型情景中的一次能源占比变化情况<sup>[19]</sup>。如果以2000年新能源技术开始成熟并进入发电领域作为起始，需要到2050—2060年才能完全实现转型。在此期间，能源革命，即能源发展范式的成功转换需要解决2个主要矛盾：1) 能源供给侧能量密度降低和供给可靠性下降与对能源供给经济性和可靠性不断提升的需求之间的矛盾；2) 新能源利用形式以用电为主的单一化增量供给趋势

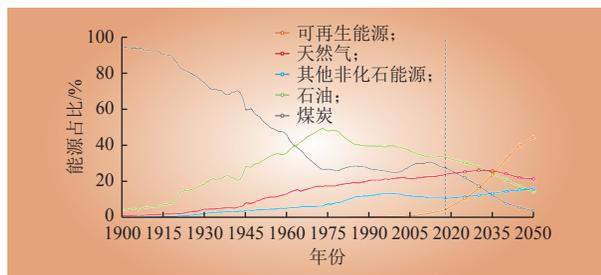


图1 快速转型情景中的一次能源占比  
Fig. 1 Proportion of primary energy in rapid transformation scenario

和社会能源需求多元化之间的矛盾。

虽然电力系统在能源革命中占据枢纽地位，但逻辑上不存在严格的承接关系，即能源的范式转换，在电力系统中未必也要范式转换。如果电力系统延续现有发展范式，在经济性、安全稳定性、可靠性甚至发展空间上，都能顺利承接新能源发电的占比不断提升直至能源革命实现，那就不会有范式转换。

### 3 电力系统的发展范式

范式转换的一般过程为原有范式—危机和反常—新范式建立。以下按照该逻辑对能源革命下，即新能源发电占比不断提升的电力系统转型过程是否存在范式转换进行分析。首先是对原有范式的分析。电力系统作为一个工业系统，其追求目标是经济、安全稳定和可靠运行，原有的范式应该是以某种较固定的构造范式支撑3个目标的不断提升。为简化问题，分别从电源侧和电网侧进行分析。

#### 3.1 从电源侧看经济性提升

传统发电技术中，以火电为例，技术研发一直从低温低压向高温高压技术、从亚临界到超临界迈进，机组参数从小容量、低参数向大容量、高参数迈进。表1是中国火电机组的发展情况。

高参数大容量机组可以不断提升能源利用效率（见图2）。由图2的煤耗曲线可知，每次发电机组的技术进步及普及，都能加速煤耗的降低。除火电机组外，发展高参数大容量机组，才能建设大型水电厂，充分挖掘水电资源潜力。

随着单机容量的提升，发电厂可以更好实现集约化、规模化开发，考虑到一次能源的供应，

表 1 中国火电机组发展历史  
Table 1 Development history of thermal power units in China

时间	机组容量/ MW	电厂	备注
1958-08	12	重庆电厂	
1958-12	25	上海闸北电厂	
1959-11	50	辽宁电厂	
1967-12	100	北京高井发电厂	
1969-09	125	上海吴淞电厂	双水冷却汽轮机
1972-12	200	朝阳电厂	
1975	300	河南姚孟电厂	高参数大容量国产机组
1979-11	300	江苏望亭电厂	燃油机组
1985-03	600	安徽平圩电厂	国产化亚临界火电机组
2000-06	800	辽宁绥中电厂	
2001-07	900	上海外高桥发电厂二期	单轴超临界燃煤机组
2004-10	600	河南沁北电厂	超临界机组国产化
2006-11	1000	浙江玉环电厂	超超临界发电机组
2021-04	1240	广东华厦阳西电厂二期	超超临界发电机组

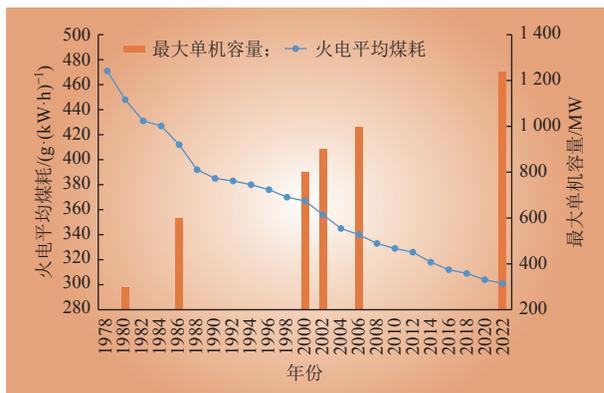


图 2 中国火电平均煤耗(1978—2022年)

Fig. 2 Average coal consumption of thermal power in China (1978—2022)

坑口、港口等远离负荷中心的大电源不断出现。因此电源侧呈现了很好的规模化发展态势。规模化发展带来的规模经济效益，其本质就是经济性的不断提升。当然，电价构成和变化比较复杂，但中国电价长期以来维持在一个较为稳定的水平也说明了规模化效益的作用。

### 3.2 从电网侧看安全稳定提升

输电技术经历了 2 次重大变革。第 1 次是从直流输电系统到交流输电系统，经历此次转型后，电可以从一个街区扩展到一个城市以上的更

大范围。进入到交流系统快速发展阶段，为了配合发电技术不断进步、大型电站的不断开发，输电电压等级不断提升，如图 3 所示，电厂与用户间的距离也越来越远，但是单个通道的输送能力越来越高。

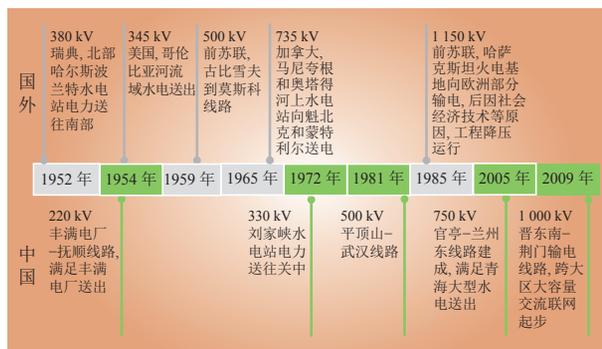


图 3 交流电压等级升级历史过程

Fig. 3 History of AC voltage level upgradation

输电电压等级提高带来的另外一个好处是，同步电网的规模不断扩大，扩大了电源资源优化配置的范围，带来了良好的经济效益和安全共享效益。

输电技术的第 2 次技术变革是从纯交流输电技术，到直流输电技术突破后的交直流混联输电。现代直流输电技术，输电距离可以达到 1000~3000 km，单通道输电功率突破了 10 GW，进一步扩大了资源优化配置的范围。

电源规模、负荷规模不断增长，电网扩张式发展，带来理想的自然助增效果，如图 4 所示（文献 [20] 提出在 2015 年之前维持这种趋势）。包括电气距离的不断缩短 ( $Y(t)$  曲线)、系统惯

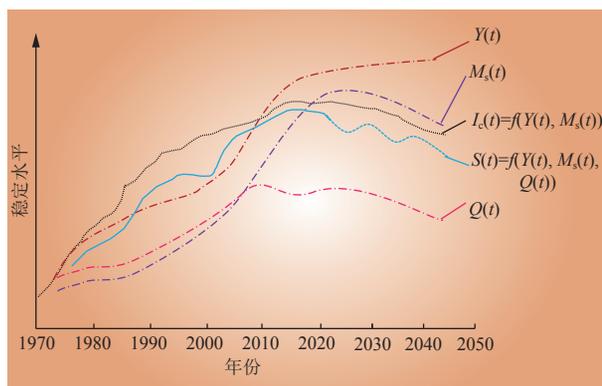


图 4 电力系统安全稳定水平及相关因素示意

Fig. 4 Schematic diagram of power system stability level and related factors



量 ( $M_s(t)$  曲线) 的不断增加、无功补偿 ( $Q(t)$  曲线) 容量的增加, 另外还带来了次一级的短路电流/短路容量 ( $I(t)$  曲线) 增长效应。电力系统的稳定水平 ( $S(t)$  曲线) 与  $Y(t)$ 、 $M_s(t)$ 、 $Q(t)$  正相关, 因此电网的扩张式发展本身就解决了电力系统的稳定问题。同时, 由于传统发电机组的功率可控可调特性好, 电力系统的电力电量平衡问题并不突出, 作为可靠性指标之一的充裕性不断提升。

综上, 电源集约化、电网电压等级提升和同步电网不断扩张, 构成了现存电力系统的发展范式, 即: 依靠技术进步和需求驱动的电力系统规模的不断增长, 实现经济性、安全性和可靠性的不断提升。这个发展范式体现了传统工业化系统思维指导下的发展特点, 即遵循规模工业的发展范式。

## 4 电力系统发展面临危机与反常—规模化范式失效

### 4.1 经济性

规模工业的发展范式带来经济性、安全性和可靠性的提升。随着能量密度越来越低的新能源发电规模增加, 电力系统成本增加, 经济性逐渐进入下行区。

文献 [21] 提出了绿色溢价的概念, 电力的绿色溢价是指从非排放源中 (包括风电、光伏发电、水电、核电和安装了碳捕集装置的火电) 获得所有电力的额外成本。通过建立模型评估, 美国实现零碳电力供应的绿色溢价为 15%, 欧洲脱碳 90%~95% 的绿色溢价达到 20%。

文献 [22] 对德国能源转型下家庭电价进行了跟踪分析 (见图 5), 其结果指出, 2000—2015 年, 新型可再生能源 (风电、光伏发电和生物质发电) 发电量占比从 1.19% 提高到 26%, 家庭用电成本从 0.18 欧元/(kW·h) 提高到 0.32 欧元/(kW·h), 提高了 80%。

文献 [23] 对中国未来新能源发电占比不断提升下电价成本进行了初步分析, 结论指出: 系统源端技术特性从“硬、集、大、稳”向“软、散、小、晃”转变, 土地资源 and 原材料供应日趋紧张, 发输电设备的利用率和经济性下降, 系统备用和调节资源的规模和性能要求越来越高, 这

些都将使得送端新能源电量的到网/到户综合成本显著上升, 初步估算可达常规电源的 1.3~1.5 倍。

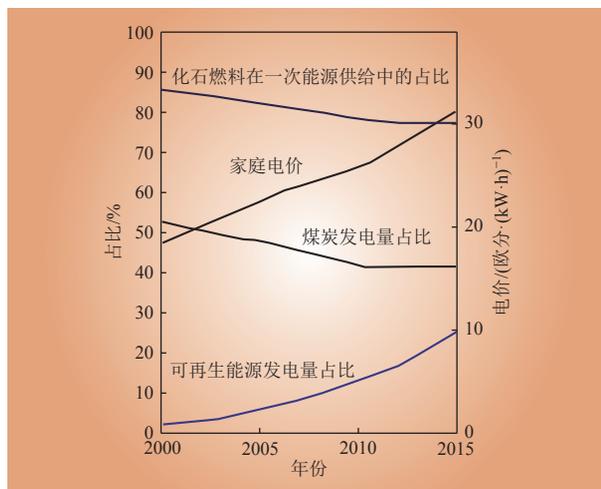


图 5 德国能源转型与家庭电价

Fig. 5 German energy transformation and household electricity prices

### 4.2 安全稳定性

新能源的大规模增长, 系统不断扩大的自然助增效果减弱甚至转向负向效应, 如图 4 后半段曲线所示: 电气距离的缩短效益不明显,  $Y(t)$  曲线进入饱和段; 系统惯量下降 ( $M_s(t)$  曲线进入下降区); 系统的无功补偿能力也下降 ( $Q(t)$  曲线进入下降区), 由此可以判断, 与上述因素强相关的系统稳定性也下降 ( $S(t)$  曲线进入下降区)。

2016 年澳大利亚发生“9·28”停电事故 [24], 2019 年英国发生“8·9”停电事故 [25], 事故时系统的本地开机出力占负荷比例均在 50% 左右。当本地开机不足时, 由于承受扰动能力变差, 新能源脱网造成连锁反应, 从而导致停电事故。

文献 [20] 分别从频率稳定和受端电网电压稳定的角度, 分析了系统可承载的新能源出力规模, 研究结论认为, 从系统稳定性要求来看, 系统最大可承载的新能源出力占比为 50% 左右, 这与实际上述 2 起发生停电事故的工况是接近的。根据图 6 所示, 从 2035 年以后, 新能源出力占负荷比例超过 50% 的运行工况将逐渐成为常态, 到 2060 年, 此工况年运行将接近 4000 h。若按照上述最高比例判断, 在不采取措施的情况下, 系统因抗扰能力下降而发生停电的风险将不断提高。

### 4.3 充裕度

充裕度是可靠性评估的一项重要指标。新能

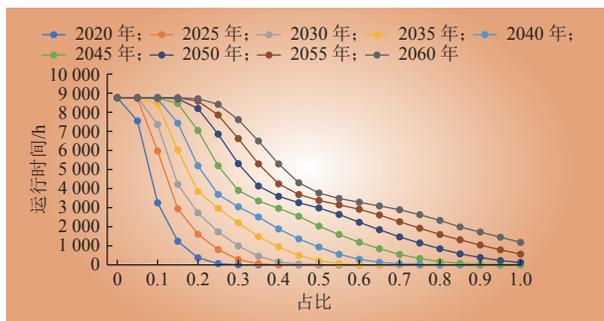


图 6 新能源发电出力占比累积曲线

Fig. 6 Cumulative curves of new energy generation output proportion

源发电区别于传统电源，其全年电量贡献相对稳定，但随机性、间歇性特征突出，出力分布不均且可预测性、可控性差，因此随着新能源发电占比逐步提高，即使能够满足电量平衡，仍容易出现电力缺口。

文献[26]给出了中国未来的基本场景，其中风电、光伏发电总规模由2020年的535 GW增长至2030年的1200 GW、2060年的5000 GW；煤电由2020年的1083 GW增长至2030年的1350 GW（峰值），然后逐步退出，到2060年保持400 GW规模；负荷电量由2020年的7620 TW·h增长至2030年的11800 TW·h、2060年的15700 TW·h；高峰负荷由2020年的1230 GW增长至2030年的1980 GW、2060年的2532 GW。结果显示，随着新能源占比提升，电力供应由少量充裕向缺口逐渐增大转变：2030年缺口86 GW，到2060年缺口达到740 GW<sup>[26]</sup>。以此场景作为分析对象，采用时序生产模拟，所得新能源占负荷比例的曲线如图6所示。

低出力意味着电力系统将面临供应不足而导致的停电风险，2019年底美国加州大停电<sup>[27]</sup>和2021年初美国得州停电便是典型案例<sup>[28-29]</sup>。

#### 4.4 发展空间危机

目前来看，欧美电网已经完全进入成熟期，发展缓慢，中国电网还处于发展期，但未来规模也将受到客观条件限制。

异速生长规模理论属于复杂性理论网络分析方法中的一个分支，是杰弗里·韦斯特在1997年提出的<sup>[30]</sup>。杰弗里·韦斯特根据生物领域的研究成果，指出某类生物指标 $Y$ 与其体重 $M$ 的关系可用指数函数表示为

$$Y = Y_0 M^b \quad (1)$$

式中： $Y_0$ 为生物体某一指标的常量； $b$ 为尺度因子，当 $b > 1$ 时，系统为超线性增长，系统规模理论上不存在上限；当 $b < 1$ 时，系统为亚线性增长，系统规模存在上限；当 $b = 1$ 时，系统为线性增长。实际世界中， $b = 1$ 系统一般都会向超线性或者亚线性转化。

文献[31]分析了电力系统满足异速增长规律所必须遵循的3个要素，即空间填充性、终端单元恒定性和演化过程的优化性，从而判断电力系统也具有异速增长规律。同时，根据不同规模的系统分析，提出了电网规模 $x$ （用导线的体积表示）与用电量 $y$ 在对数坐标下的关系为

$$\lg y = 0.797 \lg x - 0.2371 \quad (2)$$

对应式(1)， $b = 0.797$ ，可以认为电力系统和生物系统是类似的。电力系统规模是亚线性增长的，具体如图7所示。根据图7结果显示，按照现有发展模式，中国需要再建一个同等规模的电网，其负荷供应能力才能达到13500 TW·h。据预测，2035—2040年，中国用电需求即可达到该水平，即未来15~20年，不考虑设备退役更替需求，要建设一个同等规模电网，无论是投资能力，还是空间需求，都是不可能的。

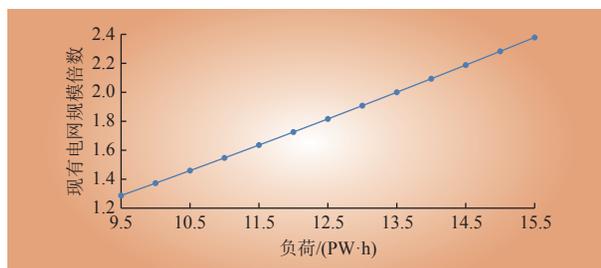


图 7 电力系统规模与负荷关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between scale and load of power system

综上，随着新能源发电占比的不断提升，原有电力系统发展范式已经无法提升系统的经济性，并解决相关安全稳定问题，系统充裕度也下降，而且电网发展空间也将受到限制，电力系统需要建立一个新的构造范式。

## 5 电力系统范式转换及目标

库恩提出：“危机使常规解谜规则变得松



弛，最终容许一种新范式实现。”电力系统为了解决危机与反常，需要突破原有的规则，构建新的发展范式。既然规模化发展不能同时提升经济性、安全性和供电可靠性，在不可能推倒重建的情况下，类似于实验替代经验一样，需要其他手段建立一个新的构造范式。

### 5.1 电力系统发展趋势分析

#### 5.1.1 电源侧

除水电、核电等电源开发外，未来新能源发电是主力。新能源资源分散，但仍然应该坚持尽量集中开发的原则。中国提出了将在中国西北戈壁沙漠上建设 4.5 亿 kW 总装机量的风电与光伏发电基地<sup>[32]</sup>。目前，新能源基地开发主要采用直流外送，直流输电的走廊规模与受端电网的直流馈入规模也逐渐接近饱和<sup>[33]</sup>。为此，新能源的发展不得不突破电源集约化开发和远距离输送的单一模式。

一方面，集中式新能源开发，若远离主网，则需要配套相当规模的辅助设施<sup>[34]</sup>，储能既可减轻电网输送压力，也可以提升电源的利用率。更重要的是，要发展新的不依赖电网的新能源消纳方式，绿氢是目前认为可行的技术方案，可以作为远离主网的配套系统。从碳中和的目标来看，则需要一整套的体系与保障，如图 8 所示。另一方面，要积极开发分布式新能源，就近供应负荷，并开发新的储/用能方式，就近平衡新能源发电。随着分布式新能源成为不可忽视的电力和电

量贡献者，原有的源-网-荷系统结构和能量单向流动方式将变成源-网-荷-源（储）的新型结构和双向流动方式。中国电力系统的控制体系、调度体系基本都是围绕电源、以电网为平台构建，现在随着电源在终端出现，电网平台、控制体系、调度体系也将调整。

中国目前光伏装机中约有 1/3 装机为分布式光伏，但由于分布式普遍接入配电网，对配电网的发展造成了较大的影响。在新能源小出力的情况下，不能有效缓解系统的供应安全风险；在新能源大出力的情况下，一方面有利于减轻主网潮流，另一方面又会减少本地传统电源的出力规模，弱化对电网的支撑。因此，在上述模式下，需展开 3 方面的工作：1) 考虑储能、多种能源互联等，构筑可控、可自治的微电网和微电网群；2) 充分利用数字化技术，整合无法构成微网的分布式、负荷、储能等资源，构建虚拟电厂；3) 加强分布式新能源的自主电压支撑能力和频率响应能力。

#### 5.1.2 电网侧

在电压等级提升方面，从未来较长时期来看，不会有新的突破。为配合新能源的集中开发及输送，从电网发展规模来看，可以通过特高压电网的布局，拓展同步电网的规模，从而在一定程度上缓解频率稳定问题，为直流落点的布局提供更大的空间<sup>[35]</sup>。

为配合新能源的分布式开发，电网的发展模

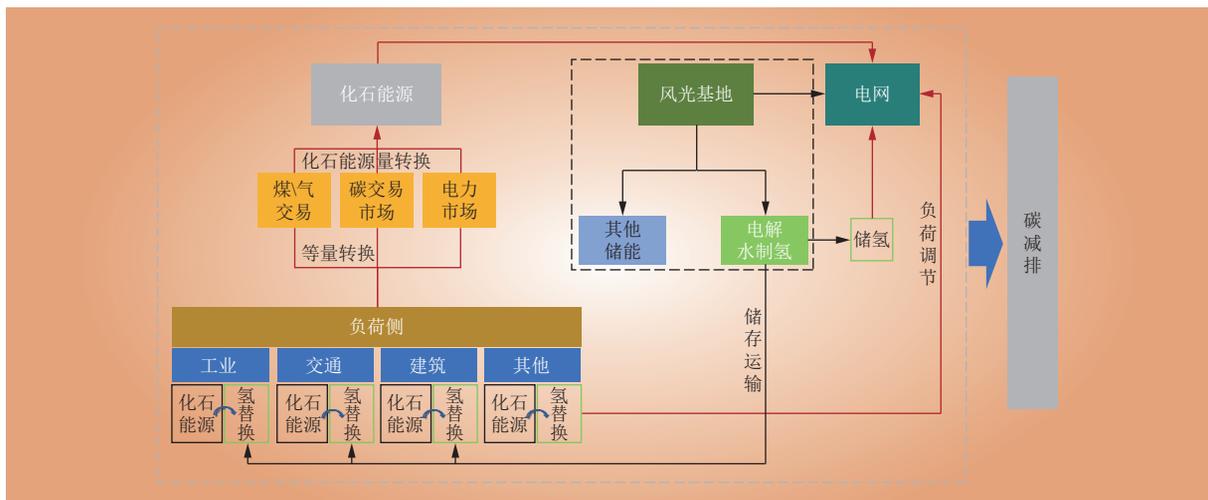


图 8 新能源发电基地制氢体系设想示意

Fig. 8 Schematic diagram of hydrogen production system using new energy power generations

式突破主要集中在配电网及以下层面。一方面，配电网将接纳微电网、分布式电源、综合能源网/终端，在物理结构上可能突破辐射式结构而形成网络化结构（包括直流配电网等）；另一方面，配电网功能也将以配电网为主逐渐向以网络为主转变，通过数字化技术，聚合虚拟电厂、微电网等资源，成为新能源消纳、负荷平衡和市场化调节的新平台。

## 5.2 构造以技术创新为主的新范式

电力系统规模化范式失效，从另外一个角度理解，即物理规模的扩展所获得的生产力增量进入平台期。建立新范式，即通过有限的经济代价获得更多的生产力增量，通过新手段获得新质生产力。基于文献[3]的社会-技术系统理论，采用协同演化模型计算电力系统的宏观环境层、中观结构层、微观技术层的权重，反映各层对电力系统发展演化的累积影响程度。计算结果显示，当前宏观环境层、中观结构层、微观技术层权重分别为 0.351、0.291 和 0.358，未来呈现宏观环境层权重基本保持在较稳定的范围、微观技术层的权重将越来越高，而中观结构层（电源、电网自身发展）的权重下降的趋势。因此，技术创新将成为范式转化的重要内涵和内容。

技术创新一直伴随电力系统的发展，但从发展历程来看，主要集中于推动系统规模的成长。因此主要集中在电磁技术的研究，使得设备单体容量更大、输送距离更远、设备利用效率更高。对比以往创新，新的技术创新应具备以下特征：1) 存在的成熟技术可能有更大的利用空间（范式转换后，对原有技术适应性需要重新评估）；2) 由源-网技术创新为主向源-网-荷-储全链条技术延伸；3) 由电磁输变电技术为主向电力电子技术、数字化技术延伸；4) 由单一的能源电力技术向跨行业、跨领域技术协同转变。

技术创新都有较长的周期，以问题为导向，电力技术创新可以分为 3 个层级（见图 9）：以基础支撑技术为主的行业内技术创新，如同步调相机、新型储能、构网型支撑技术等，主要满足新型电力系统建设各阶段“保供应、保安全、促消纳”的要求；以关键影响技术为主的跨行业技术创新，如碳捕集利用存储技术、绿氢技术、大容量储能，主要满足电力系统脱碳路径的技术需

求；以颠覆性技术为主的跨领域技术创新，如核聚变、超导输电等，助力能源系统实现更快碳中和的目标。

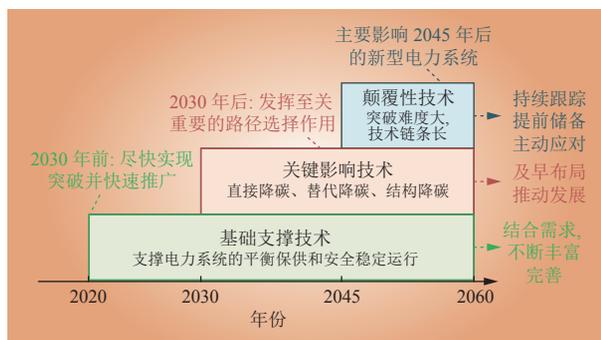


图 9 电力系统技术创新的 3 个层次

Fig. 9 The three-layer structure of technology innovation in power system

在基础支撑技术中，仍然需要一些已经成熟的技术应用，以应对新能源发电带来的一些问题，如同步调相机<sup>[36]</sup>技术。以 IEEE-39 节点系统为例，对其电源进行改造，采用新能源发电对原有火电进行逐步替代，并进行仿真分析，其结果如图 10 所示。由图 10 的结果可知，如果每个新能源厂站都按照一定比例（30%）配置调相机，则可以提升系统承载新能源的规模，尤其是对光伏发电的提升能力最为明显。

综上分析，面对电力系统发展的危机和反常，组成原有电力系统发展范式的规则逐渐松弛，电源呈现集约化和分布式并行发展，电网呈现输电网规模有限发展和配电网末端组网并行发展，技术创新将成为解决危机（主要是安全性和充裕度下降）的主要手段。从经济性的角度考虑，建立电-碳融合的统一市场可能是最可行的路径，这主要靠政策推动，这也是宏观政策层仍占有较大权重的原因，由于没有深入研究，在此不做重点分析。在新的发展范式下，经过若干年发展而建成的电力系统，即为新型电力系统。

## 6 结语

新型电力系统是能源革命的枢纽，建立新发展思维是推动新型电力系统发展的基础。以范式转换为理论基础分析传统电力系统向新型电力系统转变的过程，本文得出如下结论。

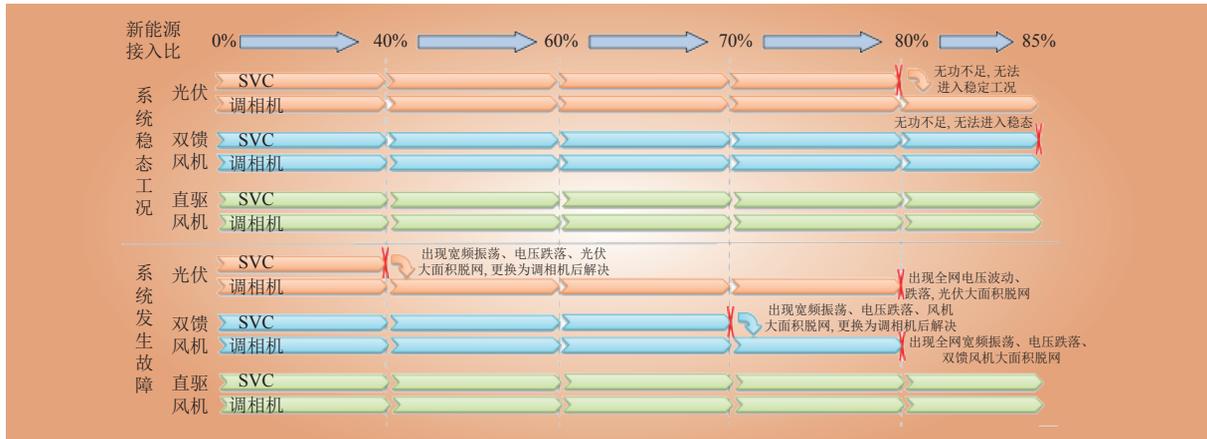


图 10 不同新能源类型与接入比例稳定情况

Fig. 10 Stability of power system with different proportions of new energy

1) 在能源革命过程中，新能源发电技术的逐渐成熟和推广，是电力系统范式转换的原因，同时也是最后过渡到新型电力系统的结果。

2) 新型电力系统的发展过程是新能源发电占比不断提升的过程，规模化发展对经济性、安全性和可靠性提升失效，因此电力系统面临一次范式转换，即由规模化主导的发展范式过渡到以技术创新为主的发展范式。

3) 通过电力系统范式转换构建新型电力系统，并不仅仅是电力系统本行业内部可以完成的，其技术创新具有向源-网-荷-储全链条、数字化、跨行业和跨领域延伸等新特征，且创新过程具有明显的阶段性和层次性。

4) 技术创新将解决电力系统安全稳定、充裕度下降的问题，但对经济性提升的作用相对不明显。经济性的问题应当引入“碳”要素，通过建立电-碳联合市场解决。

参考文献：

[1] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-27.  
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, *et al.* Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.

[2] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制 [J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.  
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System

Technology, 2016, 40(4): 985-991.

[3] 聂龑. 转型背景下中国电力系统协同演化机理及路径研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.  
NIE Yan. Research on co-evolution mechanism and path in China's power system under the background of transition[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

[4] 鲁宗相, 黄瀚, 单葆国, 等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 12-18.  
LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, *et al.* Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18.

[5] 谢宇翔, 张雪敏, 罗金山, 等. 新能源大规模接入下的未来电力系统演化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 421-430, 673.  
XIE Yuxiang, ZHANG Xuemin, LUO Jinshan, *et al.* Evolution model for future power system under massive penetration of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 421-430, 673.

[6] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.  
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, *et al.* Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.

[7] 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.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, *et al.* Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.

[8] 杨长福, 幸小勤. 库恩的范式理论与“李约瑟难题” [J]. 四川大学



- 学报(哲学社会科学版), 2008(2): 68-73.
- YANG Changfu, XING Xiaoqin. Kuhn's paradigm theory and the Needham puzzle[J]. Journal of Sichuan University (Humanities & Social Sciences), 2008(2): 68-73.
- [9] 张锐. 碳中和背景下的全球能源治理: 范式转换、议题革新与合作阻碍[J]. 学术论坛, 2022, 45(2): 16-27.
- [10] 舒印彪, 薛禹胜, 蔡斌, 等. 关于能源转型分析的评述(一) 转型要素及研究范式[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 1-15.
- SHU Yinbiao, XUE Yusheng, CAI Bin, *et al.* A review of energy transition analysis part one elements and paradigms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 1-15.
- [11] 托马斯·库恩. 科学革命的结构[M]. 张卜天, 译. 4版. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [12] 陈振明. 评西方的“新公共管理”范式[J]. 中国社会科学, 2000(6): 73-82, 207.
- CHEN Zhenming. On the western paradigm of "new public management"[J]. Social Sciences in China, 2000(6): 73-82, 207.
- [13] 李强, 邓建伟, 晓箏. 社会变迁与个人发展: 生命历程研究的范式与方法[J]. 社会学研究, 1999(6): 1-18.
- [14] 邬建国. 生态学范式变迁综论[J]. 生态学报, 1996(5): 449-459.
- WU Jianguo. Paradigm shift in ecology: an overview[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999(6): 1-18.
- [15] (英) 杰弗里·韦斯特. 规模: 复杂世界的简单法则[M]. 张培, 译. 北京: 中信出版社, 2018.
- [16] 玛格丽特·玛斯特曼. 范式的本质[M]//伊姆雷·拉卡托斯, 艾兰·玛斯格雷夫. 批判与知识的增长. 周寄中, 译. 北京: 华夏出版社, 1987: 73-115.
- [17] (加) 瓦茨拉夫·斯米尔. 能源神话与现实: [M]. 北京国电通网络技术有限公司, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [18] 袁越. 未来的能源[J]. 三联生活周刊, 2022(8): 32-112.
- [19] 英国石油公司. 世界能源展望 2020 年版[R]. (2020-09-14)[2023-10-10]. [http://www.bp.com.cn/zh\\_cn/china/home/news/reports/news-09-14.html](http://www.bp.com.cn/zh_cn/china/home/news/reports/news-09-14.html).
- [20] 周勤勇, 赵珊珊, 刘增训, 等. 高比例新能源电力系统稳定拐点释义[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2979-2986.
- ZHOU Qinyong, ZHAO Shanshan, LIU Zengxun, *et al.* Discussion on inflection point for power system stability with high proportion of new energy generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2979-2986.
- [21] (美) 比尔·盖茨. 气候经济与人类未来: 比尔·盖茨给世界的解决方案[M]. 陈召强, 译. 北京: 中信出版集团, 2021.
- [22] (加) 瓦科拉夫·斯米尔. 能源转型: 数据、历史与未来[M]. 高峰, 江艾欣, 李宏达, 译. 北京: 科学出版社, 2018.
- [23] 周勤勇, 秦晓辉, 施浩波, 等. 新型电力系统实施路径研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2022.
- [24] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
- ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, *et al.* Analysis of "9-28" blackout in South Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6.
- [25] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191.
- SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, *et al.* Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [26] 辛保安, 陈梅, 赵鹏, 等. 碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6919-6930.
- XIN Baoan, CHEN Mei, ZHAO Peng, *et al.* Research on coal power generation reduction path considering power supply adequacy constraints under carbon neutrality target in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6919-6930.
- [27] 何剑, 屠竞哲, 孙为民, 等. 美国加州“8·14”、“8·15”停电事件初步分析及启示[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4471-4478.
- HE Jian, TU Jingzhe, SUN Weimin, *et al.* Preliminary analysis and lessons of California power outage events on August 14 and 15, 2020[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4471-4478.
- [28] 安学民, 孙华东, 张晓涵, 等. 美国德州“2.15”停电事件分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3407-3415.
- AN Xuemin, SUN Huadong, ZHANG Xiaohan, *et al.* Analysis and lessons of Texas power outage event on February 15, 2021[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3407-3415.
- [29] 王伟胜, 林伟芳, 何国庆, 等. 美国德州 2021 年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4033-4042.
- WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, *et al.* Enlightenment of 2021 texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4033-4042.
- [30] WEST G B, BROWN J H, ENQUIST B J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology[J]. Science, 1997, 276(5309): 122-126.
- [31] 张毓灵, 武志刚. 电网规模的异速生长规律初探[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 19-25.
- ZHANG Yuling, WU Zhigang. Preliminary study on allometric



- scaling laws of power grid scale[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 19–25.
- [32] 发改委何立峰：中国西北戈壁沙漠将建 4.5 亿千瓦风光基地 [EB/OL]. (2022-03-20)[2023-09-18]. [http://news.sohu.com/a/531233424\\_418320](http://news.sohu.com/a/531233424_418320).
- [33] 周勤勇. 多直流馈入受端电网直流受电规模研究 [D]. 济南：山东大学, 2015.
- ZHOU Qinyong. Studies on maximum multi-infeed HVDCs' capacity to receiving end power grid[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [34] 高超, 郭强, 周勤勇, 等. “十三五” 电力规划中新能源大规模外送的安全稳定问题 [J]. 中国电力, 2017, 50(1): 37–42.
- GAO Chao, GUO Qiang, ZHOU Qinyong, *et al.* The security and stability problems of large-scale outbound power transmission of renewable energy in the 13th five-year power plan[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 37–42.
- [35] 汤涌, 郭强, 周勤勇, 等. 特高压同步电网安全性论证 [J]. 电网技术, 2016, 40(1): 97–104.
- TANG Yong, GUO Qiang, ZHOU Qinyong, *et al.* Security evaluation for UHV synchronized power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 97–104.
- [36] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究 [J]. 电网技术, 2017, 41(1): 23–29.
- WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, *et al.* Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 23–29.

#### 作者简介:

周勤勇 (1977—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师 (教授级), 从事电力系统规划技术研究, E-mail: [zhouqinyong@126.com](mailto:zhouqinyong@126.com);

李根兆 (1998—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统规划与运行研究, E-mail: [dslaki@126.com](mailto:dslaki@126.com)。

(责任编辑 李博)

## Analysis of Power System Paradigm Shift under Energy Revolution

ZHOU Qinyong, LI Genzhao, QIN Xiaohui, SHI Haobo, CHEN Wenjing, GONG Haoyue  
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The essence of scientific revolution is the paradigm shift, which can be applied to the energy revolution. Under the goals of "carbon peak and carbon neutralization", the essence of energy revolution is the shift of development paradigm, that is, the transformation and upgrading paradigm from low energy density to high energy density, and the energy utilization paradigm shift from low environmental protection to high environment protection. Under the paradigm shift of energy development, the traditional power system is gradually appearing a power system with high proportion of new energy, which is facing risks such as decrease in economy, stability and adequacy, and limited development space. However, the original development paradigm, namely intensive power source development, high-voltage power grid and synchronous grid expansion cannot reduce the risks. The original paradigm will fail and the rules will gradually slack. Driven by such development factors as distributed power generation, microgrid and large-capacity energy storage, the transformation of technological innovation mode will lead to the establishment of a new development paradigm. The power system established under the new development paradigm is the new power system.

**Keywords:** scientific revolution; paradigm shift; new energy; new power system