

能源系统低碳转型中的气象风险

范英^{1,2}, 姚星^{1,2*}, 樊伟^{1,2}

1 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191

2 北航低碳治理与政策智能教育部文科实验室, 北京 100191

* 通信作者, yaoxing@buaa.edu.cn

收稿日期: 2023-07-19

国家自然科学基金(72021001、72204020)、教育部人文社会科学研究青年基金(22YJC630188)、国家能源集团课题项目(GJNY-22-151)、中国石油化工股份有限公司课题项目(322005) 联合资助

摘要 能源转型的主要内容是快速形成以可再生能源为主体的新型低碳能源系统, 由于可再生能源的波动性特征, 加上极端气象事件频发的影响, 气象风险已经成为能源转型的关键问题。本文立足我国实际情况, 从气象风险角度重新审视我国的低碳能源系统转型路径, 并对多种碳中和转型方案进行分析, 提出转型过程中提升应对气象风险能力的举措并给出相应的政策建议。研究认为, 为了确保能源体系在安全可靠的前提下稳步完成碳中和转型过程, 需要在提高气象预测能力、重视化石能源作用、建设智能传输体系、促进能源多样化发展、用好价格机制 5 个方面采取相应措施, 有效防范潜在的气象风险。

关键词 能源系统; 气象风险; 低碳转型; 碳中和; 极端气象

Meteorological risks in the low carbon transitions of the energy system

FAN Ying^{1,2}, YAO Xing^{1,2}, FAN Wei^{1,2}

1 School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100190, China

2 Laboratory for Low-carbon Intelligent Governance (LLIG), Beihang University, Beijing 100190, China

Abstract The main part of energy transition is to form a new low-carbon energy system with renewable energy playing a leading role. However, due to the variability of renewable energy together with the frequent occurrence of extreme weather, meteorological risks are becoming a key problem during energy transitions. Based on the situation of China, the pathways of China's low carbon energy transitions are rethought and the transitional schemes toward carbon neutrality are analyzed in this study from the angle of meteorological risks. Measures and policy recommendations for improving risk-resistant ability for meteorological risks are proposed. This study suggests that to ensure the carbon-neutral transitions of the energy system in a safe and reliable way and effectively prevent meteorological risks, the following five measures should be adopted: improving meteorological forecast ability, attaching greater importance to fossil fuels, establishing an intelligent energy transmission system, promoting diversified energy development and making full use of price mechanisms.

Keywords energy system; meteorological risk, low carbon transition; carbon neutrality; extreme weather

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.039

引用格式: 范英, 姚星, 樊伟. 能源系统低碳转型中的气象风险. 石油科学通报, 2023, 04: 512-521

FAN Ying, YAO Xing, FAN Wei. Meteorological risks in the low carbon transitions of the energy system. Petroleum Science Bulletin, 2023, 04: 512-521. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.04.039

0 引言

在应对全球气候变化的行动中，能源转型是最重要和首要的内容，这轮能源转型的本质是当前以化石能源为主体的能源系统转向以非化石能源为主体的低碳能源系统^[1]。全球能源系统转型主要依赖于大规模的可再生能源发展，而且终端用能的电气化程度将逐渐提高^[2-3]。在这个过程中，风电和光伏等易受到气象条件影响的能源技术与气候气象等自然现象密切相连，呈现频繁的波动性和不稳定性，使得能源系统越来越多地暴露于气象风险下；并且以化石能源为代表的传统提供能源保供作用的设施规模将逐渐减少，使得能源供应体系的受控程度进一步下降，增加了能源系统在气象风险中的脆弱性。

另一方面，我国可再生资源禀赋存在空间和时间上的错配，可能会扩大气象风险影响范围并在特定季节产生严重后果。尽管我国可再生资源储量巨大，但在空间分布上与我国主要能源消费中心呈现显著的逆向分布，未来的能源系统极有可能需要依赖大规模能源传输体系，可能导致局部地区的气象风险外溢向更大的空间范围。同时，以风电、太阳能发电为代表的主要可再生资源的季节性分布不均，在我国，夏季通常为一年中平均风速最低的季节，而冬季通常为太阳辐射强度最低的季节，与我国“冬夏双峰”的能源需求特征不符，易导致未来冬、夏季能源供应紧张，在特定不利气象条件下，可能引发严重的能源供应短缺事件。

气候变化的加剧将使得这一情况进一步恶化。随着大气中温室气体浓度的持续增加，进一步的气候变化将不可避免，在这个过程中，全球极端气象事件发生的频率和强度都将显著增加^[4]。特定极端事件可能同时作用于能源生产、运输与消费的多个环节，使得能源需求增加的同时减少能源供应能力，在能源系统内引发级联效应，极易造成严重的灾害性后果。

能源系统内的相关基础设施具有覆盖范围广、环境依附性强、暴露程度高等特点，潜在极端气象事件会对能源系统薄弱环节造成冲击，带来严重的气象风险。从近30年的全球大停电事件来看，自然灾害成为了最重要的诱因，相关事件的占比高达56%^[5]。在生产方面，灾害性天气会对能源生产设施的正常运行产生威胁，同时，温度、风速、光照、降水等的可变性，将导致风电、光伏、水电等可再生能源发电能力的可控性较弱。在运输方面，暴雨、台风等极端天气将对煤炭、石油、天然气、电能的运输路线、输送管道、网架结构造成冲击。在消费方面，消费者的用能结构、

用能行为对相关气象指标，尤其是温度的变化十分敏感。

本文梳理了极端气象诱发的能源供应短缺事件并分析其原因，讨论能源供给侧与需求侧潜在的气象风险，探索气象风险对能源系统低碳转型路径的影响并提出相关建议。

1 近年来的典型能源短缺事件

近年来，气象因素特别是极端气象条件对能源供应系统的影响不断加剧，已成为能源系统转型中的重要问题之一。

1.1 澳大利亚南部台风引发停电事件

澳大利亚南部电网典型特征为可再生能源发电占比大，2016年9月28日，澳大利亚南部电网出现极端天气导致风电机组大规模脱网，最终引发停电事件，这是世界上首次由极端天气诱发新能源大规模脱网导致的局部电网大停电事件^[6]。事发当日，新能源发电出力占比超过45%，共有14个风电场并网。台风、暴雨使得瞬时风速严重超出线路的风速承载范围及风电机组的切出风速，造成六次线路故障，伴随着9个风电场脱网，电网面临25%功率缺额，电网频率瞬间跌落，致使全网崩溃停电。期间，两次黑启动预案均失败，最终经过7.5小时抢修，恢复了大部分用电，50小时后恢复了全部用电。此次事件断电持续时间长、影响范围广^[6]。

南澳停电事故发生主要原因有：第一，气象预测出现偏差。事发前气象部门已经发布极端天气预警，但是实际状况比预测状况更加恶劣，超出电网承载范围。第二，电力系统安全可靠性能不足。在极端天气状况下电网安全裕度有限，一旦更坏情况出现将无法继续安全运行，调度计划缺乏鲁棒性。第三，系统惯量及备用不足。风电、光伏装机比例增加，燃煤、燃气机组退出运行，导致系统惯量下降，缺少备用支撑，气象风险抵御能力下降。第四，网架结构薄弱。极端天气情况出现时，线路承载能力较弱，最终丧失输电能力。

1.2 美国得州极端寒潮引发停电事件

美国得克萨斯州发电装机以天然气和新能源为主，与外部电力互联互通能力薄弱，相对孤立。2021年2月，由于北极气团南下，美国中南部地区遭遇低温寒潮天气，受数年来未遇的持续极寒、暴风雪影响，得州

出现了严重的大断电事故。由于天然气管道冰冻受堵,无法及时提供天然气,燃气机组缺乏燃料供应不得不停运。此外,持续多日的极寒天气增加了用户取暖需求,电采暖负荷急剧上升。加之,风电机组由于叶片覆冰,发电能力大幅下降。极寒天气迫使得州电网超过40%的发电容量停运,叠加迅速增加的电能负荷,并且缺乏外部电网支援,最终电力供需严重失衡,实时市场电力价格一度超过9 000美元/MWh,停电人口达450万^[7-8]。

得州停电事故发生主要原因有:第一,天然气系统抵御极寒天气能力薄弱。由于未采取有效的防冻防护措施,天然气井、管道被寒流冻结,在生产、加工和运输等多个环节出现故障,装机占比较高的燃气机组停机导致较大的电能缺口。第二,电力系统安全可靠不足。风电等可再生能源渗透率不断提高,当风电受冰冻影响发电能力下降时,由于电力系统备用不足,没有足够的保供电源作为支撑。第三,独立的市场机制缺乏互保互济能力。在美国,得州是唯一一个拥有独立于全国的电网系统,当该地区电网超负荷运行、供电不足时,无法从其他地区获得有力的电力支援。第四,需求响应机制不完善。出现电能缺口后,调度机构通过号召节电、轮流停电、强制限电等方式管控居民、商业等用电行为,但是可响应容量规模较小。另外,天然气缺失需求响应机制的辅助调节,没有实质性的激励措施来有效地削减天然气负荷需求。

1.3 我国四川夏季极端高温引发有序用电事件

我国四川省水力资源丰富,发电结构以水电为主,2022年四川省水力发电装机容量达到9749万kW,发电量占全省总发电量的80%以上。2022年8月,遭遇有完整气象观测记录以来最强的高温天气,高温带来空调用电需求激增,电负荷创历史新高。并且入汛以来,四川省主要流域来水严重偏枯,多个水库水位线严重下降逼近死水线,部分中小水库几近干涸,水电发电能力锐减,即使全部火电满负荷运行,仍存在较大的电力缺口,电力供需严重失衡。四川省面临历史同期最高气温、最少降雨、最高负荷、最大缺口的叠加局面,为此,四川启动三级保供电调控措施,紧急下达有序用电方案,“对四川电网有序用电方案中所有工业电力用户(含白名单重点保障企业)实施生产全停(保安负荷除外)”,经济社会发展受到较大冲击。

四川应急限电事件发生主要原因有:第一,电源装机结构单一有待优化。四川省水电装机占比在80%左右,缺乏充足的常规电源作为支撑,无法形成有效

保供能力。第二,具有调节性能的水电装机比例较低。四川省水电装机主要为径流式水电,径流式水电按照来水量实时发电,不具备储存、调节功能,无法提前蓄水为以后可能出现的枯期做准备。第三,跨省跨区双向互济互备能力弱。四川省长期承担着“西电东送”任务,已建成的“六直八交”通道主要用于电力单向外送,省外受电通道容量有限,不能双向互济互保、互供互备,当出现较大电能缺口时电力稳定供应面临较大压力。第四,负荷侧需求响应机制不完善。由于需求响应实施效果不佳,用户负荷调节潜力尚未充分挖掘,在高温天气下负荷激增,但是未得到有效削减,负荷过载引起线路及设备故障。

1.4 我国山西暴雨引发煤矿停产事件

山西长期以来是我国煤炭生产的重要基地,截至2020年,山西省原煤产量占全国原煤产量的27.7%,超过内蒙古重回产煤第一大省份。2021年10月2日20时至7日8时,山西大部分地区出现极端强降水天气,全省最大降水量超过250 mm,是有气象记录以来当地10月平均降水量的10倍以上。此次暴雨累计降雨量大、持续时间长、降水极端性突出并伴有雷电、强对流和降温,引发山洪和地质灾害,部分河流出现险情,防汛压力较大。作为煤炭大省,多个煤矿处于受灾范围之内。

此次煤矿停产事件发生主要原因有:第一,连续降水和地质灾害对当地煤炭生产带来影响,煤矿涌水量增大且地下水位升高,为防止发生积水灌井和突水淹井等情况,煤矿不得不停产。第二,强降雨引发洪涝灾害,使得山西南部地区的煤矿外运线路受阻,出现了顶仓现象,对全国的煤炭保供以及电力供给方面造成短期冲击。相关研究指出,此类强降雨事件与气候变化的关系密切,随着气候变暖,大气可容纳水汽能力增加,导致极端强降水和极端干旱发生的可能性增大^[9]。

2 碳中和转型中的气象风险

在能源系统的碳中和转型中,供给侧和需求侧都存在较大的气象风险。

2.1 能源供给侧的气象风险

极端的气象条件将对能源供给侧产生重大影响,从影响机理来看具体表现为以下几个方面:

1) 风力发电能力主要受风速水平影响,风电机组

发电需要风速水平介于切入风速与切出风速之间。当出现大气静稳时,风速低于切入风速,风机无法正常运转;而当大风天气风速超过切出风速时,为了保护风机安全,风机需要收浆停机。同时,冰冻雨雪天气易导致风机结冰脱网,上述气象条件均有可能导致风力发电的出力能力严重受限。

2)光伏发电能力主要受辐射强度和温度影响,在雨雪天气与阴霾天气条件下地表接收的太阳辐射水平较低,积雪还有可能遮蔽光伏面板导致光伏发电能力受限。同时极端高温将使得光伏组件效率下降,极端低温也容易导致相关元器件故障损坏。

3)水力发电主要受流域径流量影响,由高温引发的干旱事件通常会导致降水量与径流量的减少,从而影响水力发电能力,尤其对我国而言,夏季通常为汛期,一旦发生干旱事件对能源供给侧影响更为严重。

4)气象条件还将影响煤炭等主要化石能源的生产和运输,干旱将引起内陆河水位下降,不利于煤炭水路运输,同时也增加了火力发电的取水难度。冬季的极端低温也可能引发港口结冰,限制航运、港口正常作业,影响煤炭运输。

5)变压器、输电线等能源基础设施也同样容易遭受恶劣天气的影响,酸性雨水将造成此类设备金属构架表面腐蚀,冰冻凝结在输电线路上将引起冰闪、脱冰跳跃等现象,台风、洪涝等灾害事件可能造成相关设施的永久性损坏,雷电不仅会对电气设备产生电磁干扰,而且容易出现雷击跳闸事故。

2.2 能源需求侧的气象风险

当前,供暖与制冷能耗占全球能源消耗的50%左右,造成约40%的能源相关碳排放。这类能源消费会直接受到气象因素的影响,尤其受温度的影响较大。气象风险会通过影响昼夜交替和季节变更的供暖和制冷持续时间和需求规模来影响能源需求。大量文献研究了气象对全球或区域范围内供暖和制冷能源需求的影响,研究发现能源需求与温度之间呈现显著的“U”型关系,即当温度低于7℃时,每降低1℃能源需求将增加2.8%,当温度高于25℃时,每增加1℃能源需求将增加14.5%^[10]。其中,居民用能受气温的影响最大,用能高峰期主要集中于夏季和冬季^[11],且这类用能需求的弹性较低^[10]。

受到这一特征的影响,近年来,在能源供需过程中,满足峰值需求的矛盾愈加突出。以电力部门为例,近年来最高用电负荷增长率普遍高于全社会用电量的增长率,相关研究指出,年均温度每增加1℃将导致

年电量增加9.2%,但峰值负荷将增加36.1%^[10]。随着未来终端用电电气化率的逐渐提升,这一矛盾将进一步凸显。叠加气候变化加剧的影响,即使能够顺利实现1.5度目标,极端高温事件、强降水事件、干旱事件等发生的强度和频率都将明显增加^[4]。极端气象事件的级联效应,可能将能源供给与能源需求推至两个极限,一方面造成能源供给能力的大幅受限,另一方面造成能源需求的急剧增加,给能源系统安全稳定运行带来重大挑战。

3 气象风险对我国能源系统低碳转型的影响分析

可再生能源的利用方式以发电为主,因此能源系统低碳转型的核心是电力部门的发电能源结构向高比例可再生能源过渡。

3.1 我国电力系统低碳转型的路径

国际国内多家权威机构都对我国电力系统低碳转型进行了预测分析^[12-21],本研究整理分析如表1和表2所示。

虽然各个文献对面向碳中和的电力系统低碳转型路径有所差异,但基本上都有以下共识。

首先,风电与太阳能发电将迎来快速发展,逐渐成为装机量与发电量的主体。尽管当前我国风电与太阳能发电占发电量结构中的比重不足14%,但随着未来风电和太阳能发电的持续高速增长,这一比重将升高到53.0%~72.0%,成为电力供应体系的主体电源形式。其中,不同研究对于风电和光伏未来具体的技术规模预计区间较大,存在一定分歧,相关研究预计未来电力系统中的风电装机规模为 $(12.4\sim 28.0)\times 10^8$ kW,年发电量 $(4.8\sim 7.3)\times 10^{12}$ kWh,太阳能发电装机规模为 $(14.1\sim 45.0)\times 10^8$ kW,年发电量 $(2.2\sim 6.1)\times 10^{12}$ kWh。这类波动性电源规模的增加扩大了电力系统对储能技术的需求,相关研究受建模视角、技术参数的差异影响,不同转型方案认为,储能装机规模介于 $(2.7\sim 15.9)\times 10^8$ kW。

其次,化石能源的角色定位将发生深刻变化,由基荷能源向调峰备用电源转变^[22]。当前化石能源电力仍是我国电力供应体系的主体电源,占总发电量比重超过60%,装机规模超过 12×10^8 kW。未来化石能源占发电量的比重将大幅下降至3.7%~16.0%,并且机组利用率将大幅下降。然而,关于未来电力系统中所保留化石能源机组规模则存在一定分歧,一部分观点认

表1 我国能源低碳转型的发电量构成(10^{12} kWh)

Table 1 Composition of electricity generation for China's low-carbon energy transition(trillion kWh)

目标年份	2022年		2050年				2060年		
	方案	1	2	3	4	5	6	7	
煤电	5.7	0.0	2.1	0.9	0.9	1.2	0.5	0.7~1.2	
气电	0.3	0.6	-	0.4	0.4	1.1	0.3	0.1~1	
其中:化石能源+CCUS	-	0.0	-	0.4	0.8	2.3	-	0.8~2.1	
核电	0.4	1.5	0.4	2.4	2.3	2.0	2.6	2.4~2.7	
水电	1.4	2.0	1.2	1.5	1.5	1.9	2.1	1.9~2.2	
风电	0.8	5.7	7.3	4.9	5.8	5.1	4.8	4.1~4.6	
太阳能发电	0.4	5.8	2.2	3.0	3.1	6.1	4.5	3.8~4.2	
生物质发电	0.2	0.7	-	0.2	0.3	1.1	0.9	0.3~0.8	
其中:BECCS	-	0.5	-	0.2	0.3	0.9	-	0.3~0.6	
总计	8.7	16.3	13.2	13.1	14.3	18.5	15.7	13.3~16.7	

注:

方案1:2050年,电力系统碳中和^[12];方案2:2050年,电力系统80%可再生能源^[13];方案3:2050年,全球温升2°目标^[14];方案4:2050年,全球温升1.5°目标^[14];方案5:2060年,碳中和可持续转型情景^[15];方案6:2060年,碳中和^[16];方案7:2060年,碳中和^[17]

表2 我国能源低碳转型的发电装机容量构成(10^8 kW)

Table 2 Composition of installed power generation capacity for low-carbon energy transition in China (100 million kW)

目标年份	2022年		2050年				2060年				
	方案	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
煤电	11.2	0	11.4	9.7	1.9	1.8	2.6	10.7	0	0	3.6
气电	1.1	4.0	2.3	2.8	2.0	2.0	3.7	2.7	5.2	3.4	3.1
其中:化石能源+CCUS	-	0.1	-	8.3	0.7	1.5	6.3	-	-	-	1.9
核电	0.5	2.0	0.6	2.7	3.3	3.3	2.9	3.3	2.5	4.2	2.3
水电	3.7	5.5	3.4	2.5	4.1	4.2	6.5	5.4	7.6	5.2	5.6
风电	3.7	22.5	26.3	15.7	23.1	27.4	23.2	20	25.0	28.0	12.4
太阳能发电	3.9	37.9	14.1	18.9	22.1	23.7	38.1	30	38.0	38.8	45.0
生物质发电	0.4	1.9	0	0	0.4	0.5	2.2	2.1	1.8	0.2	4.6
其中:BECCS	-	0.8	0	0	0.3	0.5	1.8				0
储能	0.5	11.2	2.7	6.1	11.7	13.3		12.0	7.5	15.9	9.6
总计	25.6	85.8	60.7	58.3	68.9	76.7	79.2	86.2	87.6	95.6	81.6

注:

方案1:2050年,电力系统碳中和^[12];方案2:2050年,电力系统80%可再生能源^[13];方案3:2050年,电力系统减排80%^[18];方案4:2050年,全球温升2度目标^[14];方案5:2050年,全球温升1.5度目标^[14];方案6:2060年,碳中和可持续转型情景^[15];方案7:2060年,碳中和,其中煤电装机含应急电源为6.7亿kW,气电装机含应急电源0.7亿kW^[16];方案8:2060年,碳中和,其中气电装机含燃氢机组2亿kW^[19];方案9:2060年,碳中和^[20];方案10:2060年,碳中和,其中生物质发电装机含其他清洁燃料机组^[21]

为仅需保留 4×10^8 kW以下的化石能源机组,另一部分观点则认为仍需保留 12×10^8 kW以上的化石能源机组提供备用能力。

再次,未来水电、核电、生物质发电等受限于资源潜力或建设条件约束,进一步增长空间有限。综合上述研究,未来水电的装机增量空间不超过 3.9×10^8 kW,在未

来电力系统中的年发电规模不超过 2.2×10^{12} kWh,占总发电量比重小于14%。核电的装机增量空间不超过 3.7×10^8 kW,在未来电力系统中的年发电规模不超过 2.7×10^{12} kWh,占总发电量比重小于18%。未来生物质发电的装机规模将维持在 2.2×10^8 kW以下,年发电规模不超过 1.1×10^{12} kWh,占总发电量比重小于6%。

最后，以CCS (碳捕集与封存技术, Carbon Capture and Storage)技术为代表的碳移除技术成为电力系统低碳转型的重要补充。以CCS技术为代表的碳移除技术是目前实现化石能源低碳化利用的唯一技术选择，尽管部分研究未针对CCS技术进行具体讨论，但不可否认在碳约束的目标下，化石能源电力的持续使用与CCS技术密切相关，在不同转型方案中，化石能源机组的CCS改造规模介于 $(0.1\sim 8.3)\times 10^8$ kW。同时，CCS技术与生物质发电结合后的BECCS (生物质能源碳捕集与封存, Bio-Energy with CCS)技术，是电力部门实现净负碳排放的重要来源。

综合上述研究，在实现低碳转型的过程中，“可再生能源+储能”与“化石能源+CCS”是两条重要的技术路径，具有一定的竞争关系。不同研究规划的转型方案对于这两条技术路径选择存在一定的挤出效应，即往往当转型方案中可再生能源部署较多的情况下，储能装机规模也更大，反之，当转型方案中保留的化石能源规模较大时，完成CCS改造的机组规模也较大。这意味着，未来储能和CCS技术的成本与技术适用性将决定转型过程中这两条技术路径的竞争力水平，从而影响整体能源系统的转型路径选择。

3.2 低碳转型方案的可信容量评估

气象风险将大幅降低可再生能源机组的可信容量。可信容量指等可靠性前提下，各类电源可以视为常规机组的容量大小。容量可信度指可信容量占电源装机

容量的比例^[23]。可信容量与电力技术出力的时序特性、渗透率、容量需求等相关，可通过有效带载能力 (effective load carrying capacity, ELCC)、等效可靠容量 (equivalent firm capacity, EFC) 等方式量化各电力技术的可信容量。随着能源系统碳中和转型，电力系统中风电和光伏等可再生能源逐渐成为主体电源。风电和光伏具有波动性、随机性、间歇性，其发电功率和并网特性会对电力系统安全稳定运行产生影响，同等容量的风电和光伏在可靠性方面无法与传统火电相比。因此，非常有必要度量装机规划中各类电源对电力系统充裕性的贡献度。可信容量对可再生能源为主体的电力系统规划具有指导意义，是电力系统确定应急电源规模，评估抗气象风险能力的重要依据。

可再生能源为主导的布局增加了电力系统在气象风险中的脆弱性，正确评估电力系统可信容量是有效应对极端气象的关键。从气象风险角度来看，低碳转型要求风电、光伏的部署规模非常大，但由于其发电出力的不确定性，在可靠性分析中无法与相同容量的常规机组同等对待，导致系统总容量的可信度降低，在面临极端气象时容易出现能源供应短缺问题。正确评估电力系统可信容量，特别是可再生能源可信容量，是有效应对极端天气的关键。本文参考了文献16、24-26中关于各技术的可信容量系数计算了表2中各转型方案的可信容量，并结合文献16、20-21、27-28关于未来高峰负荷需求的预测结果，根据可信容量和负荷下限评估了电力盈余情况，结果如图1所示。

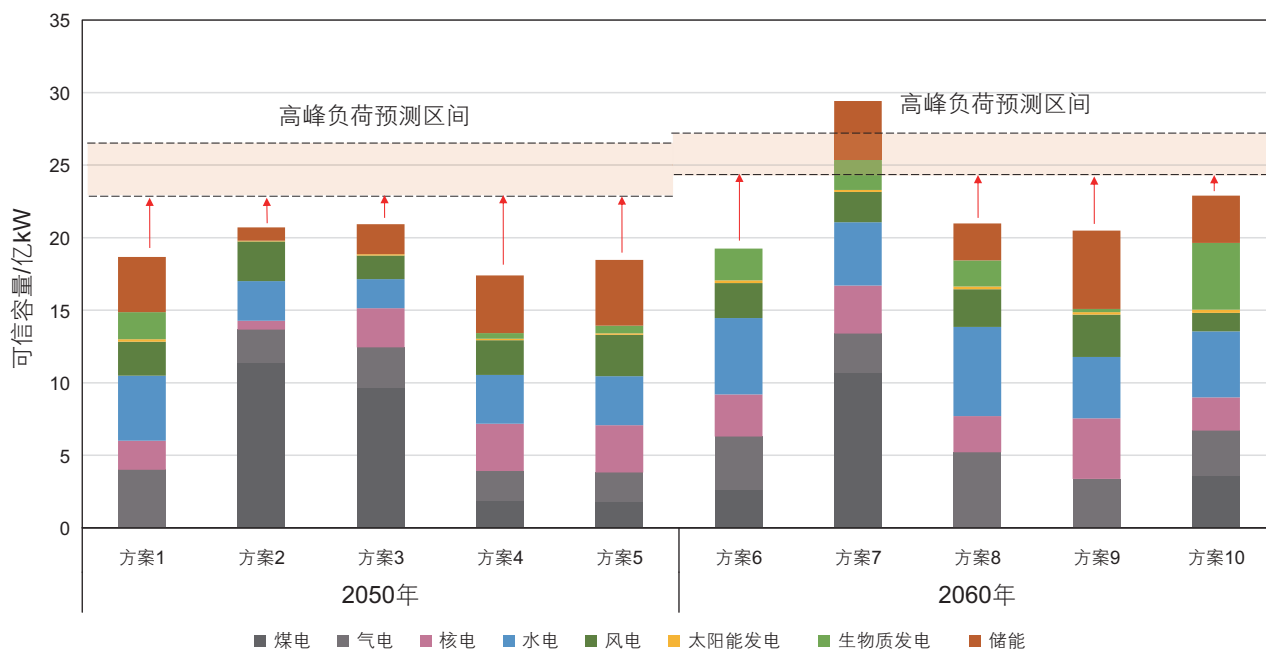


图1 不同规划方案的电力盈余情况

Fig. 1 Power surplus situation of different planning schemes

上述方案的可靠容量可能无法满足未来的高峰负荷需求,当气象风险出现后,系统将面临电力平衡缺口。根据表2的装机规划结果,各类电源实际装机容量远高于最大高峰负荷需求,整体约为3倍左右,但是容量可信度较低。风电、光伏装机规模普遍占总发电装机容量的60%以上,但能提供的可靠容量不足20%,对电力系统充裕性的贡献远小于相同容量的常规机组。虽然储能技术的部署可以一定程度上提高风电、光伏的等效可靠容量,但总体增量有限。所以除了方案7外,大部分规划方案的可靠容量难以满足电力高峰负荷需求。从图1可以看出,2050年和2060年电力系统面临的可靠容量缺口为 $(1.1\sim 4.7)\times 10^8$ kW左右。如果再按照《电力系统技术导则》,装机增加2%~5%的负荷备用、10%的事故备用、5%检修备用,电力平衡的缺口更大,因此方案7保留了 7×10^8 kW以上的化石能源应急机组。应急电源在日常情况下停机作为备用,当高温、严寒、干旱等气象风险导致高峰负荷供电出现缺口时,应急电源启动进行保供,保供结束后仍恢复到停机备用状态,能够有效提升电力系统韧性。

3.3 提升应对气象风险能力的措施

能否抵御潜在气象风险是能源系统低碳转型中面临的严峻考验,确保电力系统供应能力安全可靠是能源碳中和转型核心环节。

储能成为提升风电和光伏容量可信度的关键,需要推动技术创新和完善商业模式。电力系统低碳转型的显著特征是新能源在装机结构中占据主导地位,增加了系统大范围 and 长周期电力电量平衡难度,对电网安全构成严重威胁。新能源与气象强相关的出力特性导致容量可信度较低,风电为8%~12%,光伏低于3%,若仅依赖风电和光伏弥补可靠容量缺口,将需要新增数十甚至数百亿千瓦机组部署。储能作为一种优质的灵活性调节资源可以平抑功率波动,能够有效提升风电和光伏的可靠容量,若依赖储能弥补可靠容量缺口,将需要增加 $(3\sim 14)\times 10^8$ kW储能装机而不需要新增额外的风光机组。因此,要根据风电和光伏发展速度配套相应规模的储能设施,推动储能技术低成本、高安全、长寿命的发展,建立健全储能的标准体系、市场机制、商业模式,促进储能与电力系统发电侧、电网侧、用户侧等各个环节的深度融合发展,发挥储能在提升风电光伏容量可信度和保障电力系统安全低碳转型等方面的独特优势。

加快常规机组低碳化改造和灵活性改造,发挥其

应急备用作用,并需要同步调整价格机制和推动低碳技术应用。常规机组是提供可靠容量的重要来源,增加 $(1.1\sim 4.7)\times 10^8$ 装机即可弥补可靠容量缺口,同时也是电力系统碳排放的主要来源,控制常规机组的发电量是实现能源系统碳中和转型的关键。但是,必要的煤电装机是电力系统低碳转型的重要保障,承担着保障供电、调节频率、支撑电压的重任,特别是极端气象出现,风电、光伏、水电等出力水平较低情况下。煤电在短期内难以被完全替代,因此需要加快高煤耗、高排放、难调节煤电机组的低碳化改造和灵活性改造,并控制发电量。煤电将逐步由提供电能向提供辅助服务转变,发挥兜底保供、备用应急的作用。煤电角色转变导致利用小时数下降,单一电量的上网电价机制无法覆盖装机成本,无法体现容量价值,需要推动建立电量电价+容量电价的两部制电价机制。同时,受碳中和目标约束,需要扩大CCUS规模并降低成本,发挥CCUS对煤电机组的降碳潜力。

水电、核电、生物质能有效提高电力系统可靠容量,但受可开发规模有限需要技术的攻关突破。水电、核电、生物质与火电相比等具有清洁、低碳优势,并且有一定的调节能力,在提供系统可靠容量方面具有重要的价值。若通过其中某一种电源弥补可靠容量缺口,水电、核电、生物质装机分别需要增加 $(1.3\sim 5.8)\times 10^8$ kW、 $(1.1\sim 4.7)\times 10^8$ kW、 $(1.1\sim 4.7)\times 10^8$ kW。但是,水电、核电、生物质未来可开发规模有限。水电随着逐步开发,剩余可开发工程逐步向河流上游、高海拔地区深入,面临位置偏远、条件恶劣、地址复杂、交通不便、施工困难、成本昂贵等问题。核电受泄露后果严重、选址条件严格、退役处置复杂等限制,其发展空间相对有限。生物质发电建设和运营成本相对较高,产业体系薄弱,发电技术尚不成熟,难以形成规模效应。因此,需要加快水电、核电、生物质的技术攻关突破,增加电源结构多元化,实现不同能源优势互补,增强能源系统对风险抵御能力。

3.4 能源低碳转型过程中的化石能源

虽然本轮能源转型的目标是非化石能源全面取代化石能源,但在转型过程中,化石能源仍将发挥关键作用。

煤炭是降幅最大的化石能源,但在能源转型过程中将发挥重要的调峰和备用的作用。长期以来煤炭一直是我国的主体能源,我国也是全球煤炭生产和消费量最大的国家。2020年,我国煤炭消费量约占世界总量一半,其中大部分用于发电,仅燃煤发电带来的碳

排放量就占能源相关碳排放总量的45%以上。随着能源低碳转型进程的推进,到2060年煤炭消费量将骤减80%以上,是转型过程中降幅最大的化石能源,剩余煤炭用量中约有60%用于发电厂,届时,风电、太阳能发电、生物能源、氢能等低碳能源技术及电气化的大规模推广,使得未采用减排措施的燃煤电厂和基于煤的工业过程基本被淘汰^[21]。同时,值得注意的是,虽然燃煤发电大幅度下降,但考虑到气象风险的存在,燃煤电厂在能源系统中保留的时间将长于多数预测分析结果,在CCUS技术的协助下,煤炭将实现低碳化利用,对于支撑电力系统安全稳定运行,增强极端天气应对能力,提高国家能源战略安全保障能力具有积极的作用。

石油的能源属性将被逐渐弱化,其进程取决于液体替代燃料和电驱动技术的进步速度。当前,我国是全球第二大石油消费国,石油约占能源消费总量的19%左右,由石油消费引起的碳排放占能源相关碳排放总量的12%左右。随着低碳转型进程的推进,终端用能的电气化以及氢能、生物燃料等清洁能源的普及将使得作为能源的石油需求量逐渐下降,未来大部分石油将主要用于石化生产的原料。IEA预测,到2060年我国的石油需求将下降约60%,届时,液体生物燃料、氢基燃料和电力将分别满足9%、25%和66%左右的交通运输能源需求^[21]。

天然气将扮演重要的过渡能源角色。自2000年后,我国天然气需求量稳步增加,截至2021年占能源消费量总量的比重近9%,由天然气消费引起的碳排放占能源相关碳排放总量的6%左右。得益于较低的碳排放强度,天然气将在能源转型过程中成为重要的过渡能源,其消费量将呈现缓慢上升后稳步下降的趋势。IEA预测,我国天然气消费量将在2035年左右达峰,到2060年的消费量将比当前减少近45%^[21]。届时,天然气将主要应用于发电生产、水泥生产和制氢工业,在配合CCUS技术使用后,不会产生额外碳排放。尤其在电力系统中,天然气机组是一种理想的备用机组,一定规模的天然气机组部署可以提升电力系统应对潜在气象风险的能力。

4 启示与建议

本文立足我国实际情况,从气象风险角度重新审视我国的低碳能源系统转型路径,对部分碳中和转型方案进行评估分析,为有效防范潜在的气象风险,避免转型过程中可能出现的能源短缺情况,建议从以下

5个方面采取相应措施。

(1) 强化气候气象预测能力,提高中长期预测精度。目前,针对短期的气象预测精度较高,但中长期气候气象预测能力尚不足以满足应对能源体系气象风险的需求。提高中长期气候气象预测的精度,有利于政府提前根据灾害特征做好应急预案,对潜在风险进行精细化管理与控制,削弱气象因素对能源体系造成的不利影响。

(2) 确保相关能源设施的适度冗余,重视化石能源地位。在能源转型规划中,需要充分考虑潜在极端气象事件中的供需矛盾,因地制宜地部署一定规模的备用能源设施,允许适度的能源设施冗余及可再生能源弃电率。转型过程中充分重视化石能源在碳中和转型过程中的托底保供作用,建议对特定地区退役的化石能源机组“关而不拆”,以较小的经济代价发挥化石能源技术在应对气象风险中的兜底保障作用。

(3) 建设完善的能源传输体系,形成灵活的智能调度能力。受到可再生资源逆向分布的影响,更大规模的能量传输体系是我国未来能源系统的重要组成部分,因此局部地区的气象风险将有可能波及更大的空间范围。需要构建完善的能源传输体系,形成更大范围内能源传输网络的互联互通。同时,全国范围内的能量传输过程需要有能够实现随潜在气象风险特征而实时变化的智能调度决策,从而利用区域互济来应对潜在的气象风险。

(4) 促进能源技术多样化发展,挖掘多能互补潜力。除少数灾害性气象事件外,各类气象风险往往仅对特定的能源技术过程产生影响,因此,在能源系统规划中,不能仅以经济性为唯一目标进行能源技术的部署决策,应当充分考虑到潜在的气象风险影响,给多种能源技术一定的发展空间,充分挖掘多能互补在应对气象风险中的潜力。例如对待光热、氢储能、CCUS等当前成本相对过高的能源技术,应当在政策层面给予一定程度的支持,鼓励技术研发与小规模试点示范。

(5) 形成适应新型能源体系特征的价格机制。未来,价格机制在引导能源生产、消费过程中将发挥关键作用,需要尽快研究出台适应新型能源体系特征的价格机制。例如形成能源上下游价格信号传导的合理机制,通过明确的价格信号鼓励V2G(车网融合, vehicle-to-grid)、用户侧储能、虚拟电厂等新业态的良性发展,加快推动电能量市场、辅助服务市场和容量市场等电力市场机制建设与衔接,保障火电机组由基荷电源向调峰辅助和容量备用电源的角色转变,

形成具备快速响应能力的价格引导机制, 价格机制可以成为应对潜在气象风险中, 挖掘能源供需两侧的影响能力及引导相关技术定位逐渐转变的重要手段。

参考文献

- [1] 范英, 衣博文. 能源转型的规律、驱动机制与中国路径[J]. 管理世界, 2021, 37(08): 95–105. [FAN Y, YI B W. Evolution, driving mechanism, and pathway of China's energy transition[J]. Journal of Management World, 2021, 37(08): 95–105.]
- [2] International Energy Agency (IEA). World energy outlook 2022 [R]. IEA, 2022, Paris. https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2022_3a469970-en.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA). World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway [R]. Volume 1, International Renewable Energy Agency, 2023, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>.
- [4] The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The physical science basis[R]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi: 10.1017/9781009157896.001.
- [5] 胡源, 薛松, 张寒, 等. 近30年全球大停电事故发生的深层次原因分析及启示[J]. 中国电力, 2021, 54(10): 204–210. [HU X, XUE S, ZHANG H, et al. Cause analysis and enlightenment of global blackouts in the past 30 years[J]. Electric Power, 2021, 54(10): 204–210.]
- [6] 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 H, SUN F, LI T, 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.]
- [7] 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+3666. [AN X M, SUN H D, ZHANG X H, et al. Analysis and lessons of Texas power outage events on February 15, 2021 [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3407–3415+3666.]
- [8] 张玥, 谢光龙, 张全, 等. 美国德州2·15大停电事故分析及对中国电力发展的启示[J]. 中国电力, 2021, 54(04): 192–198+206. [ZHANG Y, XIE G L, ZHANG Q, et al. Analysis of 2·15 power outage in Texas and its implications for the power sector of China [J]. Electric Power, 2021, 54(04): 192–198+206.]
- [9] 丁一汇, 柳艳菊, 宋亚芳. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响[J]. 水科学进展, 2020, 31(05): 629–643. [DING Y H, LIU Y J, SONG Y F. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(05): 629–643.]
- [10] LI Y, PIZER W A, WU L. Climate change and residential electricity consumption in the Yangtze River Delta, China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(2): 472–477.
- [11] SELESHI G, YALEW, MICHELLE T H, et al. Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios[J]. Nature Energy, 2020, 5(10): 794–802.
- [12] ZHUO Z, DU E, ZHANG N, et al. Cost increase in the electricity supply to achieve carbon neutrality in China[J]. Nature communications, 2022, 13(1): 3172.
- [13] CHEN X, LIU Y, WANG Q, et al. Pathway toward carbon-neutral electrical systems in China by mid-century with negative CO₂ abatement costs informed by high-resolution modeling[J]. Joule, 2021, 5(10): 2715–2741.
- [14] Institute of Climate Change and Sustainable Development of Tsinghua University et al. China's Long-Term Low-Carbon Development strategies and pathways: Comprehensive report [M]. Springer Singapore, 2022.
- [15] 中国石油经济技术研究院. 2060年世界和中国能源展望[R]. 北京: 中国石油经济技术研究院, 2021. [China Petroleum Economic and Technological Research Institute. World and China energy outlook for 2060[R]. Beijing: China Petroleum Economic and Technological Research Institute, 2021.]
- [16] 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): 6919–6931. [XIN B A, CHEN M, ZHAO P, 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): 6919–6931.]
- [17] 张希良, 黄晓丹, 张达, 等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. 管理世界, 2022, 38(01): 35–66. [ZHANG X L, HUANG X D, ZHANG D, et al. Research on the pathway and policies for China's energy and economy transformation toward carbon neutrality[J]. Journal of Management World, 2022, 38(01): 35–66.]
- [18] HE G, AVRIN A P, NELSON J H, et al. SWITCH-China: A systems approach to decarbonizing China's power system[J]. Environmental science & technology, 2016, 50(11): 5467–5473.
- [19] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2030年能源电力发展规划研究及2060年展望[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织,

2021. [Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Research on China's 2030 energy and electricity development plan and prospects for 2060[R]. Beijing: Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, 2021.]
- [20] 魏泓屹, 卓振宇, 张宁, 等. 中国电力系统碳达峰·碳中和转型路径优化与影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 1–12. [WEI H Y, ZHUO Z Y, ZHANG N, et al. Transition path optimization and influencing factor analysis of carbon emission peak and carbon neutrality for power system of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 1–12.]
- [21] International Energy Agency (IEA). An energy sector roadmap to carbon neutrality in China[R]. IEA, Paris. 2021. <https://www.iea.org/events/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>.
- [22] FAN Y, LIANG Z, YAO X. Regional power system transitions towards carbon neutrality: The case of North China[J]. Economic and Political Studies, 2022, 10(4): 416–441.
- [23] 张宁, 康重庆, 肖晋宇, 等. 风电容量可信度研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(01): 82–94. [ZHANG N, KANG C Q, XIAO J Y, et al. Review and prospect of wind power capacity credit[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(01): 82–94.]
- [24] 王蓓蓓, 亢丽君, 苗曦云, 等. 考虑可信度的新能源及需求响应参与英美容量市场分析及思考[J]. 电网技术, 2022, 46(04): 1233–1247. [WANG B B, KANG L J, MIAO X Y, et al. Analysis and enlightenment of renewable energy and demand response participating in UK and US capacity markets considering capacity credibility[J]. Power System Technology, 2022, 46(04): 1233–1247.]
- [25] 吴鸣, 季宇, 郑楠, 等. 基于序列运算的风光储混合微电网可信容量评估[J]. 太阳能学报, 2021, 42(03): 251–258. [WU M, JI Y, ZHENG N, et al. Assessment on credible capacity of hybrid microgrid containing wind/photovoltaic/storage based on sequence operation [J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(03): 251–258.]
- [26] 何俊, 邓长虹, 徐秋实, 等. 风光储联合发电系统的可信容量及互补效益评估[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3030–3036. [HE J, DENG C H, XU Q S, et al. Assessment on capacity credit and complementary benefit of power generation system integrated with wind farm, energy storage system and photovoltaic system[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3030–3036.]
- [27] 袁家海, 张凯. “碳中和”目标下, 新型电力系统中常规煤电退出路径研究[J]. 中国能源, 2021, 43(06): 19–26+66. [YUAN J H, ZHANG K. Coal power phase-out pathway in the new power system under carbon neutral target[J]. Energy of China, 2021, 43(06): 19–26+66.]
- [28] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望 2021 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2021. [State Grid Energy Research Institute Co., Ltd. Prospects for China's energy and electricity development 2021 [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.]

(编辑 付娟娟)