

美国得州“2·15”停电事故分析及对中国新型电力系统供电充裕度的启示

李政麒¹, 蔡 晔¹, 曹一家¹, 李 龙², 谭玉东³

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410114;2.国网湖南省电力有限公司调度控制中心,湖南长沙 410004;
3.国网湖南省电力有限公司经济技术研究院,湖南长沙 410004)

摘要:随着经济社会的发展,电力的可靠供应引发了人们的广泛关注。2021年2月15日,受极寒天气影响美国得克萨斯州发生大范围停电事故,影响用户超过480万,给社会生产生活带来剧烈冲击。简要介绍得州电力系统概况,以时间为主线梳理得州停电事故发生过程,并从电网充裕度、区域支援能力、市场机制3个方面剖析事故原因。最后结合中国新型电力系统建设背景,提出电力气象预测技术应用、新型电力系统电源结构、灵活资源挖掘及源网荷储一体化运行、电网网架结构建设等方面的启示,为保障中国新型电力系统供电充裕度提供借鉴。

关键词:得克萨斯州;极寒天气;停电;事故启示;新型电力系统充裕度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.002 中图分类号:TM73 文章编号:1673-9140(2022)05-0017-08

Analysis of "2·15" blackout in Texas and its enlightenment to China's new power system supply adequacy

LI Zhengqi¹, CAI Ye¹, CAO Yijia¹, LI Long², TAN Yudong³

(1.School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2.Dispatching Control Center, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China; 3.Economic & Technical
Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: With the fast development of the economy and society, the reliable supply of electricity has triggered a wide range of concerns. On 15th, February, 2021, a large-scale power outage occurred in Texas, USA due to the extremely cold weather. More than 4.8 million users are affected. This accident has a serious impact on industrial production and people's lives. Firstly, the general situation of the power system in Texas is briefly introduced, and then the specific process of the blackout is described in chronological order. After that, the causes of the blackout event are analyzed from three aspects: grid adequacy, regional support capability, and the market mechanism. Finally, from the perspective of the construction of China's new power system, some inspirations are proposed for the meteorological forecasting technology applications, the power supply structure of the new power system, the flexible resource and integrated operation of the source-grid-load-storage system, and the construction of the grid structure of the power grid. This work provides a reference to help guarantee the adequacy of the power supply in China's new power system.

Key words: Texas; extremely cold weather; blackout; accident enlightenment; new power system adequacy

收稿日期:2021-06-07;修回日期:2021-12-01

基金项目:国家自然科学基金联合基金(U1966207);湖南省自然科学基金(2020JJ5573);国家自然科学基金(51807010)

通信作者:蔡 晔(1988—),女,博士,副教授,主要从事电力系统运行与控制、电力市场研究;E-mail:caiye1988427@126.com

2021年2月中旬,美国得州遭遇冬季风暴袭击,全州气温骤降。极端天气下居民用电需求急剧增长,能源供应出现严重短缺。此次停电事故中,得州电力系统最高发电损失为52 277 MW,发电机组的总切机量为46 249 MW,累计停机数量356台,系统的最低频率为59.302 Hz,最大切负荷量为20 000 MW,切负荷的持续时间为70.5 h,严重威胁社会生产生活^[1]。2021年2月19日10:35左右,随着气温回升,系统逐步恢复正常运行^[1]。

剖析美国得州“2·15”停电事故原因并总结经验教训,有利于中国电力事业安全发展。文献[2]从电网规划管理角度出发,重点介绍了得州电网运营与管理机制,结合气候、区域互济能力、体制机制、应急保障能力方面分析了本次停电事件的发生原因;文献[3]基于中国电网双碳目标,给出电源结构、系统支撑与调节能力建设、电力市场化改革体制机制、科研攻关及舆论引导4个方面的建议;文献[4]通过分析得州停电的系统性原因,结合上海电网冬季负荷创新高的背景,总结寒潮停电事件经验教训,为上海电力系统安全提供借鉴;文献[5]指出极寒气候、跨区支援能力弱为停电事件直接原因,能源供应基础设施薄弱、基础设施改造意愿不强是停电事件的深层次原因分析,并总结经验教训,为提升中国电网极端情况下应对能力提供借鉴;文献[6]基于停电原因分析体系剖析事故原因,针对中国电力事业发展总结相关启示;文献[7]重点介绍得州电力市场情况,指出供需不平衡、高电价、财务危机三大问题产生的原因,并结合中国电力市场建设给出启示;文献[8-9]从新型电力系统角度出发,通过事故原因分析,分别针对中国新能源发展和电气耦合视角下电力系统安全低碳发展给出相关启示。

通过总结文献[2-9]的启示建议分布(如表1所示),发现上述文献多从电力系统改革发展、灾害应急管理、电力设施改造、灵活性资源建设等方面给出相关启示建议,但均未从新形势下电力系统供电充裕度的角度考虑。然而,随着中国“碳达峰、碳中和”进程的推进,新能源装机占比日益提高,能源结构面临重大变化;同时,又处于负荷增长期,电力供应的安全可靠面临巨大挑战。如何构建以新能源

为主体的新型电力系统,保障高比例新能源下电网供电充裕度,促进安全可持续的能源供应成为能源转型中的关键问题。

因此本文结合中国新型电力系统下供电充裕度相关问题,深入分析得州停电事故原因,总结相关经验教训,提炼出对提升中国新型电力系统供电充裕度具有借鉴意义的启示建议。

表1 得州停电事故相关文献启示分布

Table 1 The distribution of literature's enlightenment related to the power outage accident in Texas

文献	电源结构	区域互济	电力市场机制	电力设施改造	灵活资源建设	应急管理
[2]	—	√	—	√	√	√
[3]	√	√	√	√	√	—
[4]	—	—	—	—	√	√
[5]	—	√	√	√	—	√
[6]	√	√	√	—	—	√
[7]	—	—	√	—	√	√
[8]	—	√	—	√	√	√
[9]	—	—	—	√	√	√

1 得州电力系统概况

1.1 电源概况

得州具有丰富的能源资源,其原油和天然气生产量位居全美第一^[10],还拥有丰厚的风能及太阳能资源。另外,得州发电量位居全美第一,其中大部分装机由燃气机组和风电机组构成^[1],截至2021年2月,该州电源结构如图1所示。但在本次停电事故中,受天然气供应削减、风电机组结冰停机等问题影响,最高约48.6%的发电机组被迫停机^[1]。

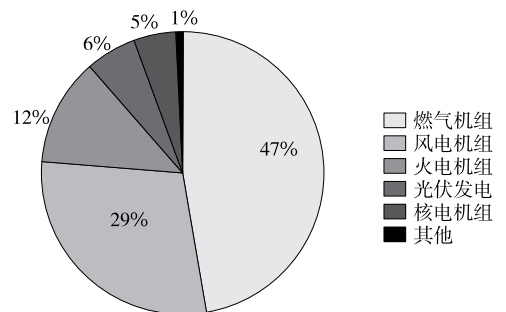


图1 ERCOT运行范围装机情况

Figure 1 Installed capacity of ERCOT

1.2 电网概况

得州电力系统主要由 ERCOT 运营,其所辖区域覆盖了得州 75% 的面积和 90% 的负荷量,并负责管理 2 600 万用户的电力供应^[11]。ERCOT 运营辖区内网架如图 2 所示^[12],其中红色线路代表 345 kV 输电线路,蓝色线路代表 138 kV 输电线路。

得州电网与美国东西两大电网隔离,电力供应很大程度上取决于自身能源禀赋,是美国唯一拥有独立电网的大州,其独立性主要体现在 2 个方面^[13]:一是物理上的独立,区域间电力联系薄弱,仅通过 5 条总容量为 1 250 MW 的直流线路与外界电网相连,电力供应自给自足,在紧急情况下无法获得有力的功率支援;二是市场体系上的独立,得州

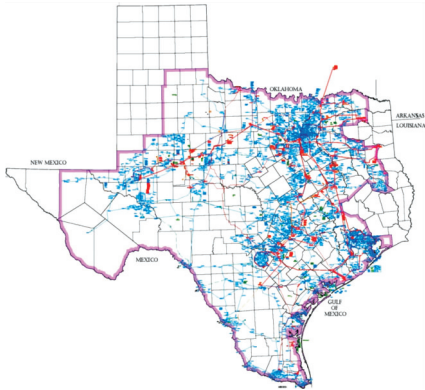


图 2 ERCOT 网架

Figure 2 Main grid of ERCOT

长年的跨区交易量约为零,得州电力现货市场采用分区边际电价,而 PJM 等区域采用节点边际电价,电价机制的不兼容导致交易上的困难。

2 事件过程

2.1 能源紧急报警机制

ERCOT 设置一套多层次的能源应急机制,根据备用容量与修复时间变化,将触发能源紧急报警(energy emergency alert, EEA),警报分为 3 个级别,其触发条件如表 2 所示^[14]。

表 2 EEA 分级和触发条件

Table 2 EEA classification and trigger conditions

能源紧急警报	触发条件
EEA1	系统运行备用容量不足 2 300 MW, 且无法在 30 min 内恢复
EEA2	系统运行备用不足 1 750 MW, 且无法在 30 min 内恢复;或频率低于 59.91 Hz 时间达 15 min
EEA3	系统运行备用不足 1 000 MW, 且无法在 30 min 内恢复;或频率低于 59.91 Hz 达 30 min

2.2 具体过程

得州电力可靠性委员会 ERCOT 于 2021 年 2 月 15 日宣布进入能源紧急状态,并在所辖范围内开始轮流停电,以防止发生全州范围的大停电。停电过程关键事件如表 3 所示。

表 3 停电过程中的关键事件

Table 3 Essential events during power outages

事件过程	日期	事件
停电前	0213	得州公共网站发布极寒紧急通知;ERCOT 采取相应措施
	0214	17:06 冬季负荷峰值创新记录 69 222 MW;能源部授权允许 ERCOT 调度受环保限制的发电机组
	0215	00:15 备用容量低于 2 300 MW, 进入能源紧急警报一级状态(EEA1) 01:07 备用容量低于 1 700 MW, 进入能源紧急警报二级状态(EEA2)
轮流停电	0215	01:20 备用容量低于 1 000 MW, 进入能源紧急警报三级状态(EEA3), 并实施轮流停电 01:53 系统频率降至最低 59.302 Hz
	0216	10:45 得州停电数达到峰值 4 893 204 户;负荷预测峰值达 76 819 MW
恢复供电	0217	气温回升,发电量逐步增加;
	0218	12:42 ERCOT 取消最后一批轮流停电名单
	0219	10:00 恢复能源紧急警报二级状态(EEA2);01:07 恢复能源紧急警报一级状态(EEA1)
	0220	ERCOT 发电容量运行备用裕度达到正常水平;停电用户数低于 10 万
	0221	ERCOT 取消与寒冷天气相关的运行通告

1) 停电前。

针对极寒天气,ERCOT 采取应对措施取消多个电力设施停电维护计划,并延缓其余停电计划;对电厂排放执行自由裁量权;提前预判天然气供应将出现短缺问题,要求得州铁路委员会对天然气运输优先安排^[1],授权允许 ERCOT 调度受环保限制无法达到最大出力或离线脱机的发电资源,以满足极寒天气下的电力需求^[15]。

2) 轮流停电。

2021年2月15日凌晨00:15,气温持续下降导致电力需求增长,电力备用容量持续下降,ERCOT 针对居民用户和小型工商业用户实施轮流停电^[16]。

2021年2月15日01:23—02:23期间系统频率变化及ERCOT切负荷情况如图3所示^[1]。系统有功不平衡导致系统频率持续跌落,01:53系统频率跌至最低59.302 Hz,并低于59.4 Hz运行时间长达263 s,为避免电力系统崩溃,ERCOT被迫增加负荷切除量以维持系统频率稳定,在此期间ERCOT共采取5次切负荷措施,累计削减负荷达10 500 MW。

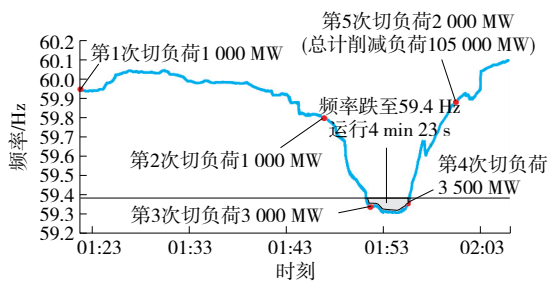


图3 2021年2月15日凌晨得州电网频率变化曲线

Figure 3 Frequency variation of the power grid in the morning of February 15

3) 恢复供电。

2021年2月20日上午09:30,得州恢复了供电能力,得州停电用户数低于10万,系统运行备用水平恢复正常^[17]。

2021年2月21日,ERCOT取消关于本次极端天气的运行通告,此次极寒天气导致的停电事故步入尾声^[18]。

3 原因分析

极寒天气导致负荷缺额严重,是本次停电事故

的直接诱因。本文结合 ERCOT 发布的事故报告,从电源充裕度、独立电网特性、市场机制角度分析本次停电事故的原因。

3.1 传统机组装机比持续下降,电网充裕度不足。

自2016年以来,得州约5 000 MW的燃煤发电机组退役停用。与此同时,得州风电机组的装机容量大幅增长,自2010年以来得州的新增机组基本是以燃气机组和风电机组为主^[19]。然而燃气机组受天然气井口冻结、天然气管道冰堵影响导致天然气供应受阻,风电机组因缺乏科学的防冻除冰措施导致风机桨叶结冰,影响风电机组正常运行,同时又缺乏足够的传统电源充当稳定的基荷电源应对电力危机,最终导致了停电事故的发生。

其中不同类型机组受到不同程度的停运,如图4、5所示^[1]。当2021年2月14日极寒天气来袭时,含14 000 MW的风电光伏在内的25 000 MW发电装机容量受天气影响被迫停机。停电期间最大停机容量高达52 277 MW,占总装机容量107 514 MW的48.6%。燃气机组最高造成大约2 750万kW的燃气机组无法并网,占该地区总装机的25.46%。风电机组最高约1 700万kW风电机组停机,占该地区总装机的15.84%。

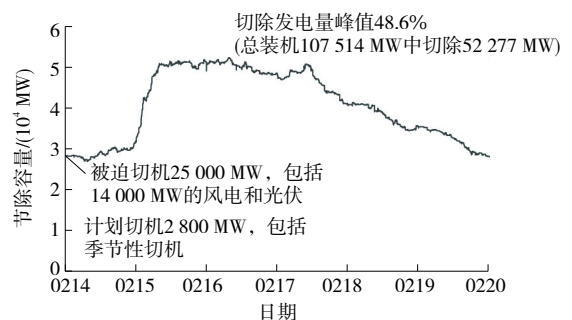


图4 发电机组停机容量变化

Figure 4 The variation of generation stopped capacity for ERCOT

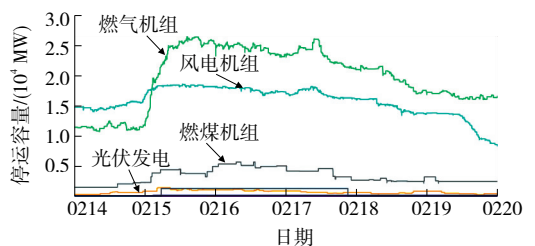


图5 不同类型发电机组停机容量

Figure 5 Generation stopped capacity for different type of generators

新型电力系统中新能源机组不具备惯性响应能力^[20],无法提供频率支撑。当大规模新能源替代传统发电机组,降低电网整体惯性,削减了电网频率调节能力,严重影响电力系统安全稳定运行。其次,新能源机组可靠性极易受环境影响,当高比例新能源电力系统遭受极端天气时,缺乏足够的可靠基荷电源提供稳定的电力输出,电力可靠供应水平大幅降低,电源侧与负荷侧严重失衡,出现大规模停电事件。

3.2 极端天气触发用户负荷陡增,独立电网导致的跨区电力支援能力不足

2020 年 11 月 ERCOT 已预测到极寒天气,但此次极端天气的强度和持续时间远远超出了预期,实际电力需求量高峰值 74 000 MW,远超 ERCOT 于 2020 年发布的资源充足性规划情景预测的 67 000 MW 的高峰需求^[21]。当极寒天气来袭时,2021 年 2 月 14 日 20:00 得州高峰负荷达到 69 220 MW,创冬季负荷历史新高,此时电网最大发电量仅约 48 000 MW,出现约 20 000 MW 电力缺口^[1],具体如图 6 所示。

得州电网负荷预测出现较大偏差,未能准确预估负荷高峰,电网也缺乏可直接调节的灵活资源应对电力供不应求局面。另外由于电网备用容量不足、电力基础设施受损、杆塔覆冰倒塌等事故频发,导致电力输送受阻;区域间电力联络薄弱,周边电网无富余电力支援,无法获得紧急功率,只能依靠轮流停电等手段维持电力供应平衡。



图 6 可用发电容量、负荷预测量及负荷削减量

Figure 6 Available generation capacity, estimated load and load shed

3.3 市场机制带来的弊端

在美国电力市场改革背景下,截至 2020 年末,美国电力私营企业服务用户占比达 72.6%,售电量占比 72%^[22]。ERCOT 作为非盈利性质独立系统调度机构,仅负责保障电力系统可靠性,电力市场

运行及电力调度^[1]。在利益的驱使下忽略电力设备的定期保养、维修更换,不愿预防小概率事件的发生而投入过多资金进行改造升级,电力设施抵御极寒能力薄弱,促使了停电事件的进一步扩大。

其次,得州电力市场通过纯能量市场稀缺电价机制来激励发电投资^[23],缺乏能量市场以外的机制促进发电投资从而获得足够的发电容量,致使极端天气下,发电容量充裕度不足,电力供应出现短缺,发生大范围的停电事故。

4 对中国新型电力系统供电充裕度的启示

实现中国双碳目标,能源行业是主战场,电力是主力军,构建以新能源为主体的新型电力系统是清洁低碳发展的必经之路。而随着经济社会发展,人们对于电力的依赖程度越来越深,新型电力系统下如何保障供电充裕度,确保电力的稳定可靠供应,成为亟需解决的问题。吸取本次得州停电事故经验教训,本文从渗透电力系统各环节的气象预测、优化电源结构、源网荷储一体化运行、保障电网区域调度能力方面阐述对中国新型电力系统供电充裕度的启示,如图 7 所示。

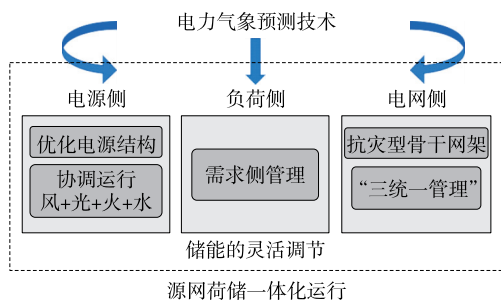


图 7 停电启示整体框架

Figure 7 Overall framework of the outage revelation

1) 基于电力气象预测技术提升电力事故预警能力。

本次极寒天气属于典型的小概率灾害事件,ERCOT 对极端天气的事前预警不足,导致能源供应及发电机组不同程度受到极寒天气影响,致使大规模停电事件的发生。同样,在 2020 年底,湖南受寒潮影响,全省最大负荷超过历史记录,达 3 100 万 kW,而由于燃煤短缺、水库缺水、风机叶片冰冻等原因导致电力供应出现缺口,全省实施分时段限

电。据资料显示,气象灾害导致的电网故障高达总故障率的60%以上。由此可见,气象条件对电网运行有着巨大影响,因此研究基于气象条件的电力设备风险预警防治,理清电力设备故障与气象灾害关系,掌握气象条件下电网运行的动态风险,建立风险预警评估,有助于电网安全稳定运行。

新型电力系统显著运行特性之一是高度依赖于气象条件^[24],气象条件的影响范围涵盖“发”、“输”、“用”各环节:电源侧应通过气象条件准确预测,把握新能源发电“脉搏”,预判极端天气下发电机组停机风险,提前做好极端天气下机组防灾措施及燃料的正常供应,实现灾害的预警防治,确保发电容量充裕,保障电力的稳定供应;负荷侧应根据气象条件准确获取负荷预测功率,对负荷侧最大电力需求量进行科学的预估,制定科学有效的应急措施应对高负荷量下的电力缺口问题,确保电力平衡。

2)构建基于供电充裕度的电源结构,协调不同电源间的优化运行。

新型电力系统中高比例新能源机组无法提供转动惯量,以支撑系统频率稳定,加上其天然的波动性和随机性,对电网安全稳定运行产生了严重的影响。因此,新型电力系统下可根据不同电源间的出力特点,发挥多电源间的互补协调特性,发挥灵活调节能力,平抑新能源出力波动,促进新能源消纳,保障电力稳定供应。

随着传统化石能源机组占比逐年降低,战略地位由基础电源向调节电源转变,但仍需重视其兜底保障作用。在得州寒潮中,新能源机组和燃气机组失效后,化石能源机组无法支撑迅速攀升的负荷,导致轮流停电,正说明了传统机组作为应急电源对新能源发展起到的支撑作用。在推进构建以新能源为主多种能源共同保障电力供应充裕度的新型电力系统中,有序规划各类电源发展,综合分析高比例新能源接入后对供电充裕度的影响,在保障系统充裕度下调整电源结构显得尤为重要。以某地区为例,针对2030年碳达峰下装机规模的充裕度进行测算,火电作为主要的调节性能源,保障电网供电充裕度火电必须有一定保有量,在2030年火电装机容量需要达到总装机规模的30%以上,才能保障高比例新能源情况下的电网供电充裕度。

3)发挥储能灵活调节作用,挖掘负荷侧需求响应潜力,推进新型电力系统下源网荷储协同运行。

储能系统作为新型电力系统中重要的快速灵活调节资源,其能源存储特性和时空转移特性在削峰填谷,调频调压,供需平衡等方面发挥作用,在源、荷侧形成灵活调节能力,支撑新型电力系统稳定高效运行^[25]。本次得州停电危机中,系统最低频率跌至59.302 Hz,若安装大功率的储能系统,实现大功率调节,可以有效缓解系统频率跌落问题,确保电力供应。在新型电力系统的背景下,应大力发展储能,首先需明确储能参与电力市场的主体身份,挖掘储能系统在多场景下的应用价值,在辅助服务市场及电力现货能源市场中积极探索储能商业模式,科学制定政策机制和技术措施,推动储能规模化发展,充分发挥储能在电力系统的灵活调节作用。

另外,在停电危机中,得州采取相关手段促进负荷侧需求响应,如呼吁用户节约用电、减少大型电器的使用、采取错峰用电的形式来减少电力需求量等,都取得了显著的效果。随着各类可调节负荷接入电网,需求响应已成为提升电力系统可靠性和经济性的一种重要手段。加强需求响应技术的研发,利用需求响应平台,实现资源的统一配置,充分发挥大数据技术在需求侧管理的作用,在机制激励及信息技术支撑下,负荷资源通过感知外部信息,调节自身行为,可实现“荷随源动”的高互动模式,优化协调供需两侧资源,缓解电力系统调峰压力,促进电力系统供需平衡。

在新型电力系统的背景下,电网运行特性已从原有“源随荷动”实时平衡模式逐步向源网荷储协同互动的非完全实时平衡模式过渡。持续推进源网荷储一体化运行,在促进供需精准匹配,深入挖掘系统灵活资源调节潜力,提升系统平衡调节能力,降低系统平衡资源投资成本,促进新能源消纳方面有着重要意义,也是新型电力系统下的内在要求。

4)构建抗灾型骨干网架,坚持电网“三统一”制度。

得州电网过于独立,与外界电网联系薄弱,周边电网难以提供功率支援是导致得州停电危机的原因之一。同样,在2020年美国加州“8·14”、“8·15”停电事件中,加州电力系统独立运营商也面临难以获得周边电网紧急功率支援的问题^[26]。

相对于得州的独立电网而言,目前中国各大区

域电网间均已基本实现互联^[27],电网网架结构日渐优化,大范围内资源配置和电网互济调节能力持续提升,然而根据经济性和风险评估规划的输电线路往往没有充分考虑极端灾害下的供电可靠性,当自然灾害的破坏程度超过电力设施防御标准时,也会出现大规模停电事件。

为确保中国电力供应可靠性,有必要从规划角度考虑提高骨干网架的防灾水平,兼顾考虑经济性和可靠性指标,差异化构建抗灾型骨干网架,保障极端自然灾害下供电可靠性,这对于坚强智能电网的建设具有重大意义。

另外,中国电网应当长期坚持电网管理制度,坚持统一规划,利用大电网互连网络架构实现资源的优化配置以及提升电网互济调节能力;坚持统一调度,有效处置自然灾害下的停电事故,防止事故的进一步扩散,将灾害损失降至最低;坚持统一管理,有序协调电网各环节,实现各类事故的有效防范、快速处理,确保中国电力系统的安全稳定运行。

5 结语

构建以新能源为主体的新型电力系统是中国能源清洁低碳转型的关键。然而新能源机组的天然不稳定特性,引发人们对于新型电力系统下供电可靠性的担忧。本文梳理了得州“2·15”停电事故的发生过程,剖析了得州电网在供电充裕度不足、区域电力支援不济、市场机制等方面问题,并从新型电力系统供电充裕度出发,总结了加强气象预测技术在电力系统多环节的应用、构建基于供电充裕度的多元电源结构、挖掘灵活资源潜力,促进源网荷储一体化运行、构建抗灾型骨干网架等方面的经验,对中国新型电力系统的建设提供一定的启示作用。

参考文献:

[1] ERCOT.Review of February 2021 extreme cold weather event[EB/OL].http://www.ercot.com/content/wcm/key_documents_lists/225373/Urgent_Board_of_Directors_Meeting_2-24-2021.pdf,2020-02-24.

[2] 严道波,文劲宇,杜治,等.2021年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J].电力系统保护与控制,2021,49(9):121-128.

YAN Daobo, WEN Jingyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas analysis of Texas blackout in 2021 and its en-

lightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and Control,2021,49(9):121-128.

[3] 冷喜武.得州停电对我国电力系统改革发展的启示[J].能源,2021(3):11-15.

LENG Xiwu.Enlightenment of the Texas' blackout incident to the reform of China power grid [J].Energy,2021(3):11-15.

[4] 张瀚舟,张铭,寇书萌,等.寒潮考验下得州和上海不同表现的启示[J].上海节能,2021(4):337-341.

ZHANG Hanzhou, ZHANG Ming, KOU Shumeng, et al.Inspiration from different performances of state of Texas and Shanghai under cold wave test [J].Shanghai Energy Conservation,2021(4):337-341.

[5] 安学民,孙华东,张晓涵,等.美国得州“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 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+3666.

[6] 张玥,谢光龙,张全,等.美国得州 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(4):192-198+206.

ZHANG Yue, XIE Guanglong, ZHANG Quan, et al. Analysis of 2·15 power outage in Texas and its implications for the power sector of China[J].Electric Power,2021,54(4):192-198+206.

[7] 刘泽扬,荆朝霞.美国得州 2·15 停电初步分析及其对我国电力市场建设的启示[J].发电技术,2021,42(1):131-139.

LIU Zeyang, JING Zhaoxia.Preliminary analysis of the 2·15 power outage in Texas, U.S.and its enlightenment to the construction of China's electricity market[J].Power Generation Technology,2021,42(1):131-139.

[8] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等.美国得州 2021 年大停电事故我国新能源发展的启示[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4033-4043.

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):4033-4043.

[9] 侯验秋,丁一,包铭磊,等.电一气耦合视角下德州大停电事故分析及对我国新型电力系统发展启示[J/OL].中国电机工程学报,2022,42(21):7764-7775.

HOU Yanqiu, DING Yi, BAO Minglei, et al. Analysis of Texas blackout from the perspective of electricity-gas

- coupling and its enlightenment to the development of China's new power system[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7764-7775.
- [10] EIA. Overview of Texas[EB/OL]. <https://www.eia.gov/state/?sid=TX>, 2022-05-19.
- [11] IMM for ERCOT. 2019 state of the market report for the ERCOT electricity markets[R]. Texas: IMM for ERCOT, 2020.
- [12] ERCOT. overview[EB/OL]. <https://eea.epri.com/pdf/epri-energy-and-climate-change-research-seminar/2017/06c%20ERCOT%20Kenneth%20Ragsdale.pdf>, 2017-06-10.
- [13] 国际能源网. 源德州困境对电网改革有何启示? [EB/OL]. <https://www.in-en.com/article/html/energy-2301392.shtml>, 2021-02-25.
- [14] DOE. Extreme cold and winter weather update # 6[R]. Washington DC: DOE, 2021.
- [15] DOE. Extreme cold and winter weather update # 3[R]. Washington DC: DOE, 2021.
- [16] DOE. Extreme cold and winter weather update # 1[R]. Washington DC: DOE, 2021.
- [17] DOE. Extreme cold and winter weather update # 4[R]. Washington DC: DOE, 2021.
- [18] DOE. Extreme cold and winter weather update # 5[R]. Washington DC: DOE, 2021.
- [19] ERCOT. The ERCOT grid and beyond[EB/OL]. https://www.utilityeda.com/wp-content/uploads/Wednesday_Session-4_ERCOT_Joel-Mickey.pdf, 2021-02-25.
- [20] 李东东, 刘强, 徐波, 等. 考虑频率稳定约束的新能源电力系统临界惯量计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 24-33.
LI Dongdong, LIU Qiang, XU Bo, et al. New energy power system critical inertia estimation method considering frequency stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 24-33.
- [21] 北极星火力发电网. “德州大停电”凸显了能源政策不同方面相互关联的属性[EB/OL]. <http://news.bjx.com.cn/html/20210304/1139650.shtml>, 2021-03-04.
- [22] 北极星火力发电网. 从德州大停电到碳中和[EB/OL]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210223/1137530.shtml>, 2021-02-23.
- [23] 朱继忠, 喻芸, 谢平平, 等. 美国稀缺定价机制及对我国现货市场建设的启示[J]. 南方电网技术, 2019, 13(6): 37-43+75.
ZHU Jizhong, YU Yun, XIE pingping, et al. Scarcity pricing of United States and its enlightenment to China [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(6): 37-43+75.
- [24] 张胜杰. 建设新型电力系统, 气象预测要跟上[N]. 中国能源报, 2021-12-06(011).
- [25] 程时杰, 文劲宇, 孙海顺. 储能技术及其在现代电力系统中的应用[J]. 电气应用, 2005, 24(4): 1-8+19.
CHEN ShiJie, WEN Jinyu, SUN Haishun. Application of energy storage technology in modern power system [J]. Electrical applications, 2005, 24(4): 1-8+19.
- [26] 赵静波, 张思聪, 廖诗武. 美国加州 2020 年 8 月中旬停电事故分析及思考[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 52-57.
ZHAO Jingbo, ZHANG Sicong, LIAO Shiwu. Analysis and reflection for the rotating outages in mid-August 2020 in California[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 52-57.
- [27] 人民网. “十四五”电网配置互济能力将不断增强(聚焦“十四五”)[EB/OL]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2021-01/04/content_2027586.htm, 2021-01-04.