DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210358

2021 年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示

严道波[1]，文劲宇[2]，杜 治[1]，杨东俊[1]，姚 伟[2]，赵红生[1]，刘 巨[1]

(1. 水火电资源优化配置与仿真技术实验室(国网湖北省电力有限公司经济技术研究院)，湖北 武汉 430077；
2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室，电力安全与高效湖北省重点实验室
(华中科技大学电气与电子工程学院)，湖北 武汉 430074)

摘要：2021 年 2 月中旬，极端冰雪、寒冷天气袭击了美国得克萨斯州(简称“得州”)，导致了得州电网大停电事故，近 500 万用户停电，严重威胁了社会生产和生活。介绍了得州电力系统基本情况和大停电事故演化过程，并从技术、管理和体制方面分析了事故发生的原因。结合电网规划发展需求，提出了防止大停电事故发生的相关建议，从加强电网安全管控、紧急事故应对、电网差异化规划、应急物质储备等方面提出了多项措施。这些建议可为电网规划运营及管理人员提供参考。

关键词：得州大停电；事故分析；电网规划

Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management

YAN Daobo[1], WEN Jinyu[2], DU Zhi[1], YANG Dongjun[1], YAO Wei[2], ZHAO Hongsheng[1], LIU Ju[1]

(1. Hydrothermal Power Resource Optimization and Simulation Laboratory (State Grid Hubei Electrical Power Co., Ltd. Economics Research Institute), Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: In February 2021, extreme snow and cold weather hit the State of Texas, United States, and caused the Texas power grid blackout. Nearly 5 million electricity customers were hit with power outages. Industrial production and even human life were seriously threatened. This paper describes the basics of the Texas power system and how the Texas blackout evolved. The reason for the blackout is analyzed from the aspects of technology, management and organization. Suggestions for preventing power system blackout accidents are put forward, combining the development needs of power grid planning, in terms of strengthening power grid safety management and control, emergency response, power grid differentiation planning, emergency material reserves, etc. These suggestions can provide a reference for the power grid planner, operator and manager.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51707070) and the Science and Technology Project of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. (No. 52153818001F).

Key words: Texas blackout; accident analysis; power system planning

0 引言

2021 年当地时间 2 月 15 日开始，受极端冰雪、寒冷天气影响，美国得克萨斯州(简称“得州”)约 40 000 MW 发电机组被迫停运。为了保障电网安全运行，得州电网主要调度运行管理机构，得克萨斯州电力可靠性委员会(ERCOT)，紧急启动大规模负荷削减计划，实行轮流停电，最大限电负荷达到 16 500 MW[1]，超过了事故发生前电网负荷的 20%以上。大规模停电严重威胁了人民生命财产安全，约 500 万用户电力供应被迫中断。此外，受发电侧供应不足，得州电力市场呈现严重供需不平衡，实时电价疯涨，最高电价达到了 11 美元/kWh[1]，是正常情况下电价的 100 余倍，增加了部分居民的用电成本。

基金项目：国家自然科学基金项目资助(51707070)；国网湖北省电力有限公司科学技术项目资助(52153818001F)

如果按照我国国务院 599 号令相关规定[2]，上述事故属于重大电网事故(二级电网事故)。考虑到 2020 年底我国湖南、江西、浙江等地也出现了比较严重的电力短缺现象[3]，因此，研究分析本次得州大停电事故的原因，吸取相关教训，对于我国新型电力系统的构建具有重要意义。

1　得州电力系统基本情况

1.1　得州电网概况

得克萨斯州(英文：State of Texas，简称得州(德州))是美国南方最大的州，国土面积 69.6 万平方千米，常住人口 2 900 万。得州是美国能源大州，以能源和石化工业著称，石油和天然气产量分别占全美 1/3 和 1/4，炼油能力占全美 1/4，风电装机规模全美第一[4-5]。2019 年国民生产总值为 18 870 亿美元，年度平均气温 19.3 ℃。

得州电网主要由得克萨斯州电力可靠性委员会(ERCOT)调度运行管理，也称 ERCOT 电网。如图 1 所示，ERCOT 电网是北美三大同步电网之一。通过 2 条背靠背直流联络线与 Southwest Power Pool(SPP)电网相连，容量为 880 MW，在紧急时段进行电力交换；通过 3 条背靠背直流联络线与墨西哥电网相连，容量为 286 MW，主要进行日前跨国电力双边交易。

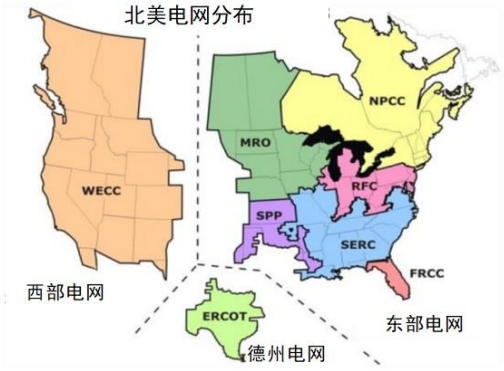


图 1　北美电网结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the USA power grid

ERCOT 电网覆盖得州 75%地域，占得州用电总负荷 90%，供电人口 2 600 万，2020 年最大负荷 74 166 MW。输电网电压等级包括 345 kV、138 kV 和 69 kV，线路总长度约 74 400 km，具体得州电网情况如图 2 所示。根据美国能源情报署(U.S. Energy Information Administration)统计数据[6]，截至 2020 年底，得州电网总装机容量约 127 240 MW(ERCOT 电网装机容量为 108 880 MW)，其中天然气发电 54.6%，煤电 14.1%，风电 27.1%，核电 3.9%，其他 0.3%，各类电源装机占比情况如图 3 所示。2020 年前三季度，得州电网总发电量 365 634 GWh，其中天然气发电 53.8%，煤电 15.9%，风电 18.8%，核电 8.6%，太阳能 2.0%。经估算，2020 年得州发电机组年平均利用小时数约 3 800 h(含新能源装机)，其中天然气发电机组 3 740 h，煤电 4 280 h，风电 2 630 h，核电 8 360 h。

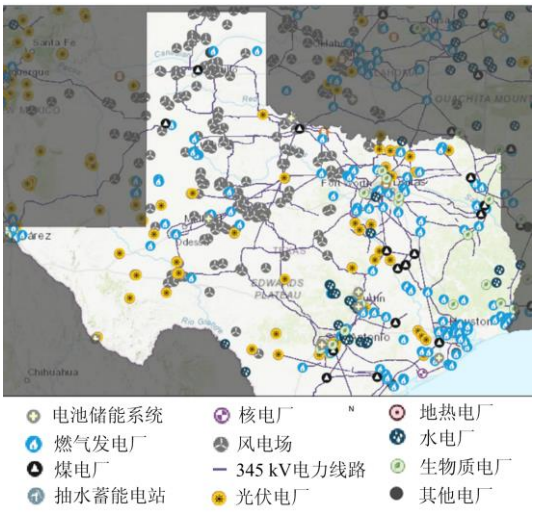


图 2　得州电网情况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Texas power grid

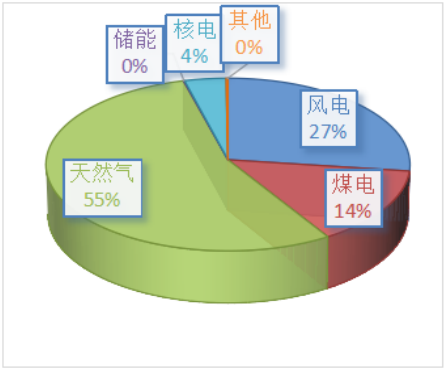


图 3　得州电网装机容量分布图

Fig. 3 Installed capacity of generators of Texas

2021 年 1 月，得州温度适宜，取暖或制冷负荷相对较小，电网整体负荷偏低，得州电网发电量为 30 697 GWh(2020 年前三季度月平均发电量 40 626 GWh)，其中天然气发电 36%，煤电 23%，风电 26%，核电 13%，太阳能 2%，各类电源发电量占比情况如图 4 所示。

对比不同时段各类型电源发电量占比与装机占比情况，可以发现得州电网运行特性如下：核电承担电网基荷，几乎全年不间断运行；由于风力资源良好，新能源作为未来电源发展方向，依靠燃气机

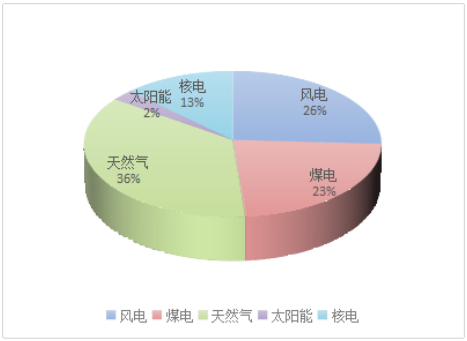


图 4　得州电网 1 月份发电情况分布图

Fig. 4 Power generation of Texas in January

组快速启停(30 min 内可从冷机到满载)的特点，优先保障消纳；煤电由于调节速度响应较慢，几乎不参与调峰调频，主要承担部分电能供应任务；燃气发电机组由于调节性能良好、调节速度快的特点，承担了系统调频调峰任务，其利用小时数随着系统负荷变化而变化。

1.2　电网运营与管理机制

得州电力市场运营和管理采用分区电价机制和能量市场平衡的方式开展。为优先消纳新能源，在系统未发生阻塞的情况下，按照新能源预测最大出力安排常规机组运行方式，新能源出力不足和系统需求预测误差由快速启停的燃气机组及可中断负荷平衡。

得州电力市场分为 5 个区域，分别为南区、北区、休斯顿区、西区和东北区，区与区之间设有传输线路极限功率约束，超过传输极限功率限制，将会导致传输线路阻塞。ERCOT 将日前到实时的市场交易和电网调度运行工作，分作日前、调整和运行 3 个时段。日前模拟运行时段为电网运行前一日的 06:00—18:00，主要通过机组组合计算，发布次日的负荷需求以及辅助服务需求。调整运行阶段为运行前一日的 18:00 到运行时刻前 1 h，主要根据电网的运行状态，评估系统辅助服务是否充足，根据电网安全需求，补充相关的辅助服务交易。运行阶段为运行时刻前 1 h 到运行时刻后 1 h 的模拟，主要根据 SCADA 系统获得的系统运行状态、机组出力、辅助服务情况等信息，以电网实时运行模拟、经济调度和负荷频率控制为约束，实现对电网的经济安全调度。

为了保障电网安全稳定运行，在实时调度运行中，ERCOT 考核机组或电厂的实际出力是否偏离接收到的基点指令。对常规机组而言，其出力超出考虑辅助服务后的基点指令值 5%或 5 MW(取二者中较小值)时，将受到偏差处罚。对于风电场而言，其出力低于基点指令值时，无论弃风与否，都不作处罚；只在弃风状态下风电场出力高于基点指令值 10%以上时才予以处罚。这导致风电场将最大出力限值设为预测出力最大值，常常存在风电出力达不到指令值的情况，给系统备用带来了较大需求。

ERCOT 通过良好的日前、调整和运行机制，能够保障电网应对一定容量的有功功率缺额，然而难以消除大规模风电功率突然减小所带来的功率缺额。针对系统发电容量迅速减小或电网频率骤降的情况，ERCOT 主要通过开启可快速启动的燃气机组，调用旋转备用和非旋转备用辅助服务以及执行紧急电力削减计划来应对。同时，ERCOT 电网有大量的可中断负荷用户通过竞价来承担备用服务，或与 ERCOT 签订紧急可中断负荷服务合同，调度员可在紧急情况下要求用户执行服务，断开负荷。在系统备用容量不足、频率稳定受到威胁时，调度机构将执行如表 1 所示的能源紧急预警计划(Energy Emergency Alerts, EEA)[7]。

表 1　ERCOT 能源紧急预警等级表

Table 1 Emergency electricity alert grades of ERCOT

级别	执行条件	执行方案
1 级 EEA 1	系统旋转备用容量小于 2 300 MW	组织发电机并网，通过 DC 联络线请求支援，切断温度敏感的可中断负荷
2 级 EEA 2	系统旋转备用容量小于 1 750 MW 或频率 难以维持 60 Hz	承担旋转备用的负荷开断； 旋转备用小于 1 350 MW 时 需求侧响应负荷开断
3 级 EEA 3	系统频率难以维持 59.8 Hz	通知旋转备用或可中断负荷 全部开断，实施轮流停电

2　停电事故演化过程

2021 年 2 月中旬，极端寒冷天气袭击美国得州，用电需求由 2 月 12 日的 52 934 MW 逐步增加到 2 月 14 日的 69 220 MW。然而，极寒气候导致天然气井口冰冻或者管道压力下降，美国中南部地区天然气产量每天下降约 63 亿立方英尺，约占美国中南部天然气产量的 30%。伴随天然气产量下降，得州电网燃气机组单位小时发电量从 2 月 15 日 00:00 时的 42 372 MWh 下降到 15 日 02:00 时的 33 096 MWh。此外，部分风电机组机械传动装置受冰冻影响，以及光伏发电受冰雪云层遮挡，区域内风电和太阳能发电受到限制，得州电网新能源单位小时发电量从 2 月 14 日 17:00 时的 9 583 MWh 下降到 2 月 15 日 20:00 时的 649 MWh。同时，部分煤电、核电由于水管结冰被迫停运。受极端寒冷天气影响，系统单位小时发电量减少了近 20 000 MWh，电网最大限

电负荷达 16 500 MW，占事故前负荷的 20%以上。如果参照国务院 599 号令相关规定，上述情况属于重大电网事故(二级电网事故)。

本次得州大停电事故的具体演化过程如下[8-14]：在用电需求增加和电源出力受限的矛盾下，ERCOT 在 2 月 15 日 01:17 时和 02:12 时分别宣布 EEA 1 级和 EEA 2 级，通知可用机组启动和承担旋转备用的负荷中断。02:25 时，由于系统频率无法恢复到 60 Hz，ERCOT 宣布 EEA 3 级，通知签订紧急可中断负荷服务合同的负荷用户断开负荷，同时实施分区循环拉闸限电，上述紧急电力负荷削减导致大量用户停电，区域内单位电价飙升至 9 美元/kWh。此外，由于部分电力设施被冰雪破坏，一部分用户被迫停电。2 月 15 日得州停电的发展过程如图 5 所示。在 ERCOT 发布 EEA 3 级响应后，系统共计切除负荷 10 500 MW。如图 6 所示，从 2 月 15 日 00:00 时，得州停电用户数由 10 万逐步上升到了 16 日最高峰值 489.3 万[11]。

为应对电力供应不足，美国代理能源部长 2 月 14 日晚发布紧急命令，根据《联邦权力法》第 202(c)条授权 ERCOT 可以调度地区所必需的发电机组，包括二氧化硫、一氧化氮、汞、一氧化碳或废水排放超标的机组。到 2 月 17 日 09:35 时，虽然与墨西哥电网联络直流受天气影响停运，损失外区支援电力 286 MW，但随着 ERCOT 电网内部发电机组逐步恢复并网发电，电力缺口减小到 14 000 MW，得州停电用户数减少到 334.1 万户，约 32%的停电用户恢复供电。此时仍有总计 43 500 MW 发电机组未并网运行，其中包括 17 000 MW 新能源机组和 26 500 MW 煤电、燃气机组。

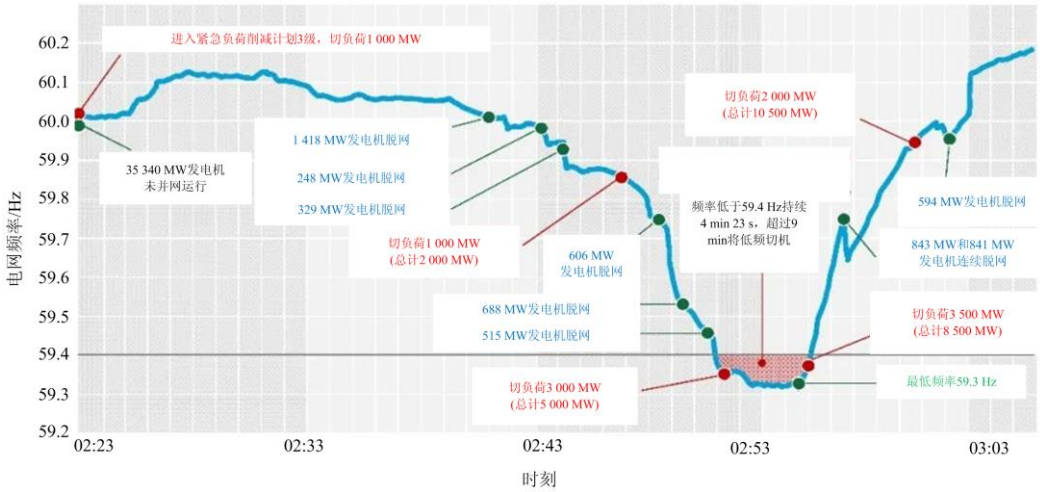


图 5 得州停电 2 月 15 日发展过程

Fig. 5 Evolution of Texas power outage on February 15

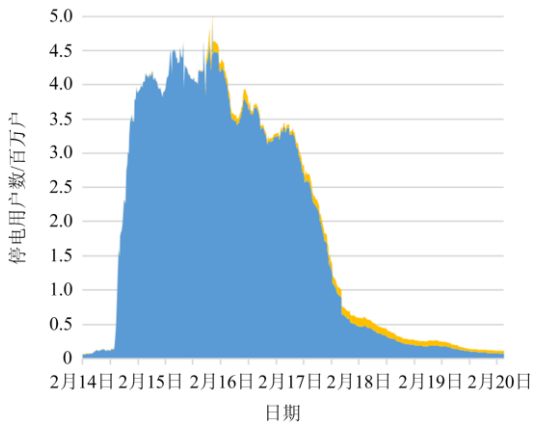


图 6 本次得州停电影响用户数

Fig. 6 Number of electricity customers affected by the power outage in Texas

从 2 月 17 日下午开始，发电机以每小时 1 000 MW 的速度恢复供电 8 000 MW，至 2 月 18 日 09:30 时，停电用户减少到 48.6 万，约 90%的用户恢复供电。

随着发电机组进一步恢复并网发电，2 月 19 日，ERCOT 宣布电网运行状态调整为 EEA 1 级，停电用户减少到 18.9 万，约 96%的用户恢复供电。此时，电网仍有约 34 000 MW 发电机组未能并网运行，其中煤电和燃气机组约 20 000 MW。

2 月 20 日，除大型工业用户和部分受电力设备损坏影响被迫停电用户 7.7 万户外，98%停电用户恢复供电，ERCOT 宣布电网进入正常运行状态。

得州大停电期间(2 月 14 日至 2 月 20 日左右)，得州电力供需情况以及各类电源每小时发电量的变化如图 7 和图 8 所示。

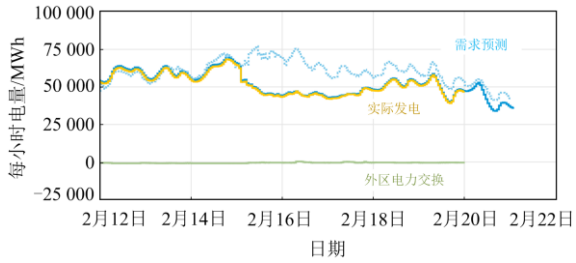


图 7 得州 2 月 12 日至 22 日电力供需形势图

Fig. 7 Texas electricity supply and demand situation from February 12 to 22



图 8 得州各类型电源每小时发电量情况

Fig. 8 Hourly power generation of each power sources in Texas

3 得州大停电原因分析

针对本次得州大停电事故发生的进展情况，结合得州电网基本情况，分析本次得州大停电事故的主要原因如下。

1) 极寒天气导致机组非计划停运是限电的直接原因。本次得州遭遇了百年一遇的极寒天气，以得州首府奥斯丁的气温为例，如图 9 所示，2 月 15 日和 16 日其最低气温比近 35 年以来 2 月份最低气温平均值低 20.3 度[15-16]。据美国能源部披露的信息，极寒天气导致燃气机组因天然气冰堵而供应不足停运、风电机组因设备结冰无法发电、核电煤电机组

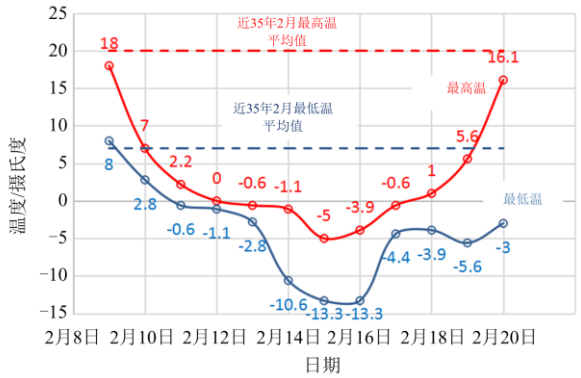


图 9 得州首府奥斯丁气温与历史情况对比图

Fig. 9 Temperature in Austin, the capital of Texas

因设备故障跳闸，总计约 40 000 MW 机组无法正常运行，超过总装机的 1/3，极大地削弱了得州电网供电能力，电源侧电力供应不足是本次得州大停电事故的直接原因。

2) 跨区和区内互济能力不足制约了用电的快速恢复。得州电网主要依靠网内电源实现电力平衡，仅通过总容量 1 166 MW 的直流与外部系统互联，跨区输电能力仅占得州电网最大负荷的 1.6%。如图 10 所示，当网内供应能力不足时，外区电力支援几乎为零[7]。无法通过跨区互济获取外部支援增加了得州供电恢复的难度，直到 2 月 20 日得州气温逐步恢复的情况下，得州电网才逐步恢复正常运行状态。同时，对比图 2 得州电源和图 11 所示停电用户分布情况图可知：得州内部电网互济能力也相对不足，在 2 月 17 日，得州主要用电负荷恢复供电的情况下，以燃气机组供电为主的休斯敦区域停电用户数量仍然相对较大。



图 10 得州外来电力交换情况（负值为购入）

Fig. 10 Texas region electricity exchange with neighboring regions (negative value is purchased)

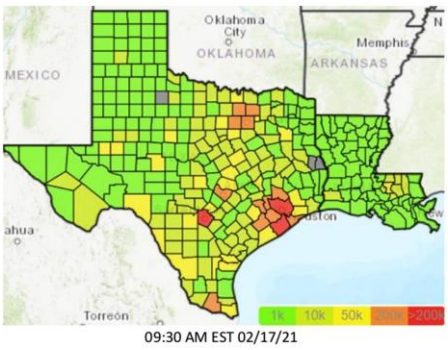


图 11 2 月 17 日得州电网停电用户分布情况

Fig. 11 Distribution of electricity customers of Texas blackout on February 17

3) 不完善的体制机制是大停电的深层次原因。电网管理体制松散是病因，“症状”则体现在电网缺乏统一规划、电网调度体系分散、私有化带来产权主体众多等诸多方面。这些问题不仅埋下了大停电

事故的“祸根”，而且一旦发生事故，很难及时止损。私有企业片面追求经济效益，忽视社会效益，造成基础设施老化，提高安全性的投入不足。近十年来得州已连续两次发生大停电事故。

与 PJM 等北美其他市场不同，得州电力市场仅运营能量市场，未运营容量市场，而是通过采用尖峰电价机制补偿机组的容量成本，尽可能鼓励电源投资和可靠供应。但仅靠尖峰电价机制，无法充分激励发电企业采用机组耐寒改造等提高可靠性的措施。本次停电事故发生前，得州电网整体发电容量充足，采用国内电力平衡原则，在考虑 14%的负荷裕度下，得州电网具有 500 MW 左右的电力盈余。然而电力市场环境下，发电企业过于追求经济效益最大化，风电机组未加装防寒或加热装置，部分核电、煤电以及燃气机组因水循环系统冰冻被迫停运，提升设备可靠性的投入与收益不符，导致极端天气下的设备可靠性相对不足。

4) 应急保障能力不足是扩大停电范围的推手。严寒天气预警后，一次能源应急储备不足。得州地区天然气电厂基本依赖天燃气管网供能，电厂缺乏足够的能源应急储备。在天然气管网冰堵的情况下，主力电源燃气机组无法发挥保供电作用。

缺乏应对极端事件的科学应急管理预案和机制，极端条件下系统运营维护和应急抢修的经验相对不足，随着气温逐步回暖，电网才逐步恢复正常。如图 12 所示，即使在气温逐步上升、电力系统恢复正常运行的 2 月 20 日，系统内仍有超过 30 000 MW 的机组未能并网运行[8]。

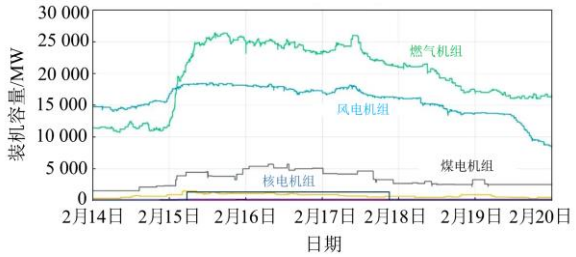


图 12 得州各类型发电机组未并网容量情况

Fig. 12 Off-line capacity of each power sources generators in Texas

4 思考和启示

合理的电源结构是电力可靠供应的基础保障。近年来，国际国内多次停电或电力紧缺事件，反映出常规电源在电力保障和可靠供应方面的“压舱石”作用。在“双碳”目标背景下，大力发展新能源的同时，如何合理兼顾常规电源及灵活性调节电源的发展规模和布局，确保极端情况下电网的合理运行，是需要仔细研究的问题。

设备耐极端环境是应对气候变化的必要措施。近年来，随着全球气候变化多端，极端天气频繁发生。在年初寒潮过程中，华中、华北多地风电机组发生受冻停运，对电网供应能力造成了一定影响。应考虑对重点地区的发电机组和输电线路开展防风、抗冰改造，在成本可控范围内，合理提高电力设备对极端气候的耐受程度。

吸取本次得州停电事故教训，结合电网规划发展需求，对电网安全发展有以下几个方面的启示[17-28]。

1) 落实能源安全战略，保持战时思维。在电网规划发展过程中对重点区域、重点负荷规划运行需具备战时思维，加快推进世界一流城市电网建设，保障重点区域、重点负荷的供电可靠性。通过差异化规划，对重要输电通道、“三跨(跨越高速铁路、高速公路和重要输电通道的架空输电线路区段)”线路、极端气候区域电力设施适当提高规划设计标准，提升极端事件下电网生存能力。

2) 强化应急管理，保障物质储备。加强应急体系建设，提升突发事件(特别是极端天气、水火灾害事件)预警能力，提升应急管理能力，编制程序化、规范化的应急处理预案，提前做好极端事件前的设备检修、物质储备和人员动员；适当配置可移动式紧急电力保障车辆，增强电网突发事件应急处置能力。

3) 平衡安全效益，坚持本质安全。统筹协调好安全和效益的关系，电网规划建设强化本质安全，重点关注电网过渡转型期安全风险，电网运行维护加强安全风险管控，排查设备安全隐患。严格落实 GB 38755-2019 电力系统安全稳定导则、国务院 599 号令，防患电网结构性风险，以安全为前提推动电网高质量发展。

4) 电网合理分区，强化联络支援。在电网合理分区的情况下，须强化联络支援。特别在我国特高压直流输电通道快速发展的阶段，需关注特高压直流双极闭锁情况下的潮流支援通道建设，建议加快推进特高压交流网架建设，化解电网“强直弱交”安全隐患，实现更大范围的灵活性资源调配，发挥大电网相互联络支援的优势。

5) 电力电量平衡，保持调节裕度。在“双碳”目标驱动下，我国新能源快速发展，需注意发挥煤电“压舱石”作用，同时积极发展需求侧灵活性调

节措施，提升电网调峰能力建设，推动抽水蓄能、电化学储能等调峰设施建设，加快推动火电厂灵活性改造，有效提升电网的运行弹性和灵活性。

6) 保障电力设备质量，守住电网安全防线。电力设备的安全可靠是电网安全的物质基础。对于电网老旧设备，建议定期开展设备运行状态评估。存在安全风险的设备，建议分批实施改造。同时加强新的电力设备入网检测和在运设备的状态评估，对设备风险“早发现、早处理”。

参考文献

[1] 关于美国德州 ERCOT 电网实施轮流限电的情况简报[Z]. 国家电网有限公司驻美国办事处信息简报.

[2] 中华人民共和国国务院令. 电力安全事故应急处置和调查处理条例[Z]. 2011.

[3] 寻因问果: 力短缺之局如何破 [R/OL]. [2020-12-19]. 电网头条，https://baijiahao.baidu.com/s?id=1686498313545627904&wfr=spider&for=pc.

[4] 王宣元, 马莉, 曲昊源. 美国得克萨斯州风电消纳的市场运行机制及启示[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 10-18, 27.
WANG Xuanyuan, MA Li, QU Haoyuan. Market mechanisms for wind generation in ERCOT market and the inspiration for China[J]. Electric Power, 2017, 50(7): 10-18, 27.

[5] 罗旭, 马珂. 美国得克萨斯州电力可靠性委员会在风电调度运行管理方面的经验和启示[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 140-146.
LUO Xu, MA Ke. Experience and enlightenment in operations of wind generation in ERCOT grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 140-146.

[6] https://www.eia.gov/state/?sid=TX.

[7] ERCOT. Energy emergency alert (EEA) tools[R/OL]. Austin: ERCOT, 2021. http://www.ercot.Com/content/wcm/lists/226525/EEA_Tools_One_Pager_Winter_2021_2-13-2021.pdf.

[8] ERCOT. Review of February 2021 extreme cold weather event[R/OL]. Austin: ERCOT, 2021. http://www. ercot.com/content/wcm/key_documents_lists/225373/2.2_REVISED_ERCOT_Presentation.pdf.

[9] DOE. Extreme cold and winter weather update #1[R/OL]. Washington DC: DOE, 2021. https://www.energy. gov/sites/prod/files/2021/02/f82/TLP-WHITE_DOE%20Situation%20Update_Cold%20%20Winter%20Weather_%231.pdf.

[10] DOE. Extreme cold and winter weather update #2[R/OL]. Washington DC: DOE, 2021. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/02/f82/TLP-WHITE_DOE%20Situation%20Update_Cold%20%20Winter%20Weather_%20Report%20%232%20FIN.pdf.

[11] DOE. Extreme cold and winter weather update #3[R/OL]. Washington DC: DOE, 2021. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/02/f82/TLP-WHITE_DOE%20Situation%20Update_Cold%20%20Winter%20Weather_%233.pdf.

[12] DOE. Extreme cold and winter weather update #4[R/OL]. Washington DC: DOE, 2021. https://www.energy.gov / sites/prod/files/2021/02/f82/TLP-WHITE_DOE%20Situation%20Update_Cold%20%20Winter%20Weather_%234%20.pdf.

[13] DOE. Extreme cold and winter weather update #5[R/OL]. Washington DC: DOE, 2021. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/02/f83/TLP-WHITE_DOE%20Situation%20Update_Cold%20%20Winter%20Weather_Sit%20Rep%20%235%20.pdf.

[14] DOE. Extreme cold and winter weather update #6[R/OL]. Washington DC: DOE, 2021. https://www.energy.gov / sites/prod/files/2021/02/f83/TLP-WHITE_DOE%20Situation%20Update_Cold%20%20Winter%20Weather_%236.pdf.

[15] https://www.timeanddate.com/weather/usa/austin/climate.

[16] https://www.willyweather.com/tx/travis-county/austin.html.

[17] 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.

[18] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.

[19] 刘伟. 电网严重故障下的电压稳定应对措施分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 163-170.
LIU Wei. Design of a current measuring sensor with self-power supply function[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 163-170.

[20] 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.

[21] 易俊, 卜广全, 郭强, 等. 巴西"3·21"大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 1-6.
YI Jun, BU Guangquan, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Brazilian power grid on March 21, 2018 and its enlightenment to power grid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 1-6.

[22] 罗剑波, 郁琛, 谢云云, 等. 关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 158-170.
LUO Jianbo, YU Chen, XIE Yunyun, et al. A review on risk assessment of power grid security and stability under natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 158-170.

[23] 胡秦然, 丁昊晖, 陈心宜, 等. 美国加州 2020 年轮流停电事故分析及其对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 11-18.
HU Qinran, DING Haohui, CHEN Xinyi, et al. Analysis on rotating power outage in California, USA in 2020 and its enlightenment to power grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 11-18.

[24] 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.

[25] XU Yan. A review of cyber security risks of power systems: from static to dynamic false data attacks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 190-201. DOI: 10.1186/s41601-020-00164-w.

[26] 林伟芳, 易俊, 郭强, 等. 阿根廷"6.16"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, 2020, 40(9): 2835-2841.
LIN Weifang, YI Jun, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Argentine power grid on June 16, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2835-2841.

[27] 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.

[28] 周剑, 罗添允, 李智勇, 等. 基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 31-38.
ZHOU Jian, LUO Tianyun, LI Zhiyong, et al. Comprehensive evaluation of power failure based on improved extension analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 31-38.

收稿日期：2021-04-02

作者简介：

严道波(1969—)，男，硕士研究生，高级工程师，研究方向为电网企业管理，电网规划及运行；E-mail: liu1988wo@126.com

文劲宇(1970—)，男，教授，博士生导师，主要研究方向为电力系统运行与控制、储能与新能源并网、微电网与舰船电力系统等；E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn

杜　治(1977—)，男，本科，教授级高工，研究方向为电网规划及运行。

（编辑　魏小丽）