

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

刘泽扬, 荆朝霞*

(华南理工大学电力学院, 广东省 广州市 510640)

Preliminary Analysis of the 2·15 Power Outage in Texas, U.S. and Its Enlightenment to the Construction of China's Electricity Market

LIU Zeyang, JING Zhaoxia*

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

摘要:2021年2月15—19日,美国得克萨斯州(简称“得州”)电网出现了轮流削减负荷运行的停电事故,引起了全球广泛关注。介绍了得州电网、电力市场概况,以时间为主线梳理了停电事故的发生与发展过程,以及事故期间的电力市场运行状况,初步分析了事故中供需不平衡、高电价、财务危机三大问题产生的原因。最后,总结停电事故的经验教训,提出对我国电力市场建设的相关启示。

关键词:美国停电; 削减负荷; 电力市场; 稀缺定价

ABSTRACT: From February 15 to 19, 2021, a rotating outage due to load-shed occurred in the power grid of Texas in the United States, causing widespread global concern. In this paper, an overview of the power grid and electricity market in Texas was introduced firstly. Then, this paper sorted out the occurrence and development process of the accident with time as the main line, and paid attention to the operation status of the electricity market during the accident period. Moreover, the causes of the three major problems such as imbalance between supply and demand, high electricity price, and financial crisis in the accident were analyzed. Finally, this paper summarized the experience and lessons of power outages, and put forward relevant enlightenments to the construction of China's electricity market.

KEY WORDS: U.S. power outage; load-shed; electricity market; scarcity pricing

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B090911001)。

Project Supported by Key Area Research and Development Project of China (2019B090911001).

0 引言

美国东部时间(下同)2021年2月15日,受极端严寒天气的影响,得克萨斯州负责电网运行的独立系统运营商(independent system operator, ISO)——得州电力可靠性委员会(electric reliability council of Texas, ERCOT)——发出能源紧急警报(energy emergency alert, EEA)^[1],在所辖范围内启动轮流停电。ERCOT在历史上只有3次启动过全州范围内的轮流停电,分别是1989年的12月22日、2006年4月17日以及2011年2月2日。

断电导致天然气供应链、水供应系统、交通系统等民生领域遭受重大破坏,伤亡事故频发。美国能源部(department of energy, DOE)报告^[2-7]指出,最高峰时得州有超过480万用户无电力供应。随着发电侧可靠性调度机组投运、停运机组恢复正常,需求侧实施控制性负荷削减,ERCOT维持区域内电力平衡并于2月19日恢复了峰值停电规模中96%用户的供电,取消了轮流停电。

得州是全美最大能源生产、消费州,此次停电事故的发生引起了全球广泛关注。2015年,中共中央、国务院发布《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》^[8],其中明确指出将保障电力可靠供应作为改革坚守的第一条基本原则。正确

看待本次事件、吸取相关经验教训，对我国电力系统发展、电力市场建设具有重要意义。

1 得州电网与电力市场概况

1.1 电力系统概况

得州地处美国南部，如图 1 所示，得州电网与外部互联有限，运作基本上独立于美国东西部地区，不受联邦政府的监管。得州电网仅通过 2 回容量总计 820 MW 的直流联络线与西南电力库(southwest power pool, SPP)相连，3 回容量总计 430 MW 的直流联络线与墨西哥相连^[9]。

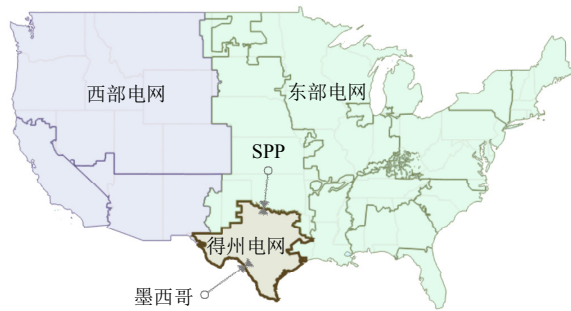


图 1 得州电网
Fig. 1 Texas grid

ERCOT 负责管理得州 2 600 万客户的电力供应和分配，覆盖了该州约 75% 的面积和 90% 的电力负荷。ERCOT 作为非盈利机构，运行职责包括保证电力系统可靠性，平衡供需并维持 60 Hz 的系统频率，促成竞争性的批发、零售市场等^[1]。ERCOT 管辖范围内有超过 74 800 km 输电线路、超过 680 台发电机组，其中最主要的发电资源是天然气，其次是风力。得州现有装机总容量为 107 514 MW，各燃料类型发电装机容量及其占比如图 2^[1]所示。据统计，在 2021 年 1 月份实际发电量中，燃气发电量为 10 744 GW·h，占比 35%；风力发电量为 7 702 GW·h，占比 25%；燃煤发电量为 6 803 GW·h，占比 22%^[6]。

1.2 电力市场概况

得州自 1995 年开始电力市场化改革。1996 年，ERCOT 成为全美第一个 ISO，电力批发市场试运行。1999 年，关于电改的参议院 7 号法案签署，得州着手建设以区域市场(zonal market)为架构的现货实时市场。2010 年，经重新设计，节点市场(nodal market)取代了区域市场^[10]。

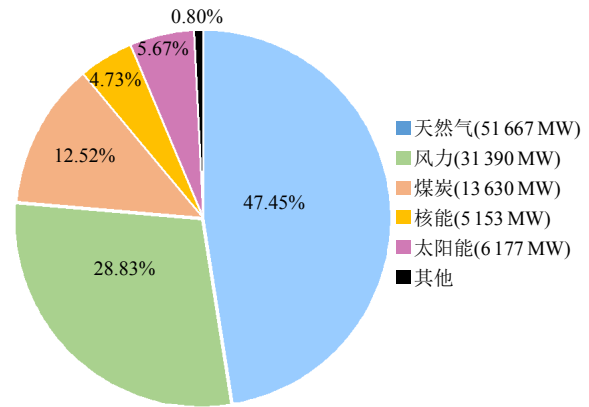


图 2 各燃料类型发电装机容量及其占比
Fig. 2 Installed capacity and its proportion of each fuel type power generation

得州电力市场是单一能量市场(energy only market)，未建立容量市场。为了在实时市场中反映备用资源的稀缺价值，ERCOT 于 2014 年引入实时备用价格增量(real-time reserve price adders, RTRPA)，允许批发电价在系统资源稀缺时段陡升，从而使边际机组回收成本^[11]。RTRPA 每 15 min 计算一次，在安全约束经济调度后根据运行备用需求曲线计算得到，可表示为

$$A_{RTRP} = (V_{LL} - P_{LM}) \times \pi(R) \quad (1)$$

式中： V_{LL} 为失负荷价值(value of loss load)； P_{LM} 为节点边际价格(locational marginal price)； $\pi(R)$ 为失负荷概率函数，当实时备用 R 小于最小备用要求时，其值为 1。

2015 年，为了解决可靠性调度时带来的价格反转问题，ERCOT 引入了可靠性部署价格增量(real-time reliability deployment price adders, RTRDPA)。RTRDPA 反映了有无可靠性机组组合(reliability unit commitment, RUC)或负荷备用时电能量价格的差异，可表示为

$$A_{RTRDP} = \lambda - P_{LM} \quad (2)$$

式中 λ 为 RUC 或负荷备用出力为 0 时系统电能量价格。

RTRPA 和 RTRDPA 在 ERCOT 全范围内均只有一个区域统一值。ERCOT 实时市场未采用电能量、辅助服务联合出清，实时结算点电价(real-time settlement point price, RTSP)可表示为

$$P_{RTSP} = P_{LM} + A_{RTRP} + A_{RTRDP} \quad (3)$$

2 停电事故的发生与发展

2.1 能源紧急警报机制

ERCOT 设置了一套渐进的应急程序，目的在于避免运行备用不足时发生全系统的崩溃。当系统需要额外资源维持平衡时，ERCOT 会向市场参与者发布运行条件通告(operating condition notice)；当运行备用分别小于 3000、2500MW 且预期无法在 30 min 内恢复时，ERCOT 将通过热线或公告栏向市场参与者发布事件咨询(advisory)与监视(watch)通告^[12]。

进一步地，当运行备用小于 2300MW 时，能源紧急警报(EEA)激活，此时允许使用稀缺条件下的限定资源。2021 年冬季 ERCOT 部署的备用资源包括响应备用服务(responsive reserve service, RRS)、紧急响应服务(emergency response service, ERS)、直流联络线进口、需求响应等，合计提供额外容量 2800MW^[13]。EEA 共分为 3 个级别，具体触发条件及系统操作步骤^[14]如图 3 所示。

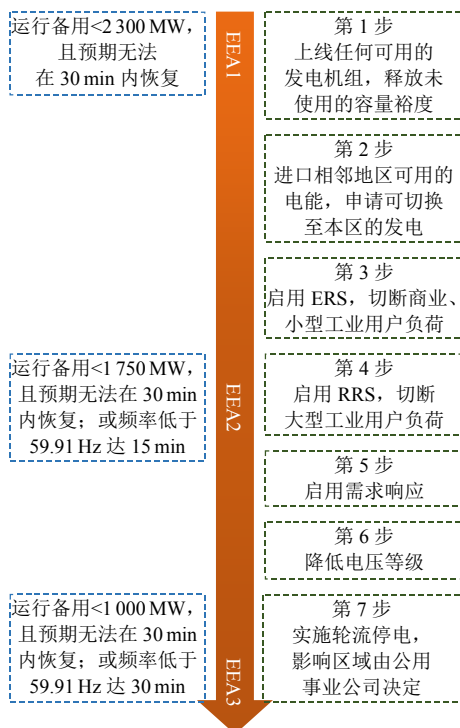


图 3 EEA 触发条件与系统操作步骤
Fig. 3 EEA trigger conditions and system operating steps

2.2 事故过程

2.2.1 停电前兆

2 月 8 日，ERCOT 针对预期到来的极寒天气

发布运行条件通告，2 月 10 日发布事件咨询通告，2 月 11 日发布事件监视通告。ERCOT 在负荷预测中宣称，如果气温持续下降，2 月 15 日上午将出现创纪录的电力需求^[15]。ERCOT 经营区内发电厂收到极寒天气准备通知，要求审查燃料供应、实施冬季天气应对程序等。

2 月 14 日 06:00—07:00PM，系统峰荷达到 69 150 MW。ERCOT 向 DOE 发出请愿书^[16]，称史无前例的寒冷天气导致创纪录的冬季用电需求，超过了最极端的季节性负荷预测。ERCOT 要求 DOE 授权允许在 2 月 14—19 日 EEA 生效期间，调度因排放或其他环境许可限制而无法达到最大出力或离线脱机的发电资源。DOE 根据《联邦电力法》第 202(c)条发布紧急命令^[17]，授权允许 ERCOT 调度二氧化硫、氮氧化物、汞、一氧化碳、废水排放超过限值的发电机组，以满足电力需求。进一步地，ERCOT 取消了所辖范围内输电线路的运维停运，审查计划停电的机组能否提前恢复服务，并放松了新冠防疫限制，在各现场增配支援人员。

2.2.2 轮流停电

2 月 15 日午夜，各种燃料类型电厂发电量大幅下降，部分发电机组脱机。00:15AM，ERCOT 发出 EEA1 级响应；01:07AM，上升为 EEA2 级；01:20AM 上升为 EEA3 级，实施轮流停电^[1]。

图 4 为 01:23—02:03AM 期间系统频率变化及 ERCOT 切负荷情况。可见，随着发电容量减少，系统频率偏离 60 Hz 并开始下降，59.4 Hz 以下的低谷期持续了 4 min 23 s，最小值为 59.302 Hz。ERCOT 进入 EEA3 后，即刻削减 1000MW 负荷；频率低谷期 2 次切负荷量陡增，分别达到 3000、

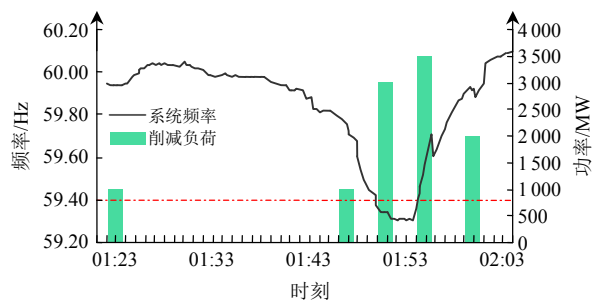


图 4 系统频率与削减负荷
Fig. 4 System frequency and load-shed

3 500 MW。全日累计削减负荷 20 000 MW，最高峰时发电容量损失 52 277 MW，约占总容量的 48.6%^[1]。

2 月 16 日，受到天灾破坏性停电和调度控制性停电的影响，得州无电力供应数最高峰时达到 4 893 204 户^[2]。ERCOT 指示公用事业公司分别在下午、夜间恢复了 40 万户、60 万户供电。负荷预测峰值(无削减负荷)为 76 819 MW，达到本次事故期间的最大值。

2 月 17 日，截至 09:30AM，得州无电力供应数为 334 万户。气温回暖使部分发电机组恢复了服务，但 ERCOT 宣称仍然需要削减 14 000 MW 负荷，原因之一是损失了中西部直流联络线的进口电量^[3]。得克萨斯州州长要求液化天然气出口终端回拨业务，指示任何来源的天然气离开得州前必须出售给当地的发电机组。17 日下午，负荷开始以 1 000 MW/h 的速度恢复^[18]；晚上，ERCOT 宣布自上午以来已恢复了大约 8 000 MW 负荷^[19]。

2.2.3 恢复供电

2 月 18 日，发电量持续增加，ERCOT 于 12:42AM 取消了最后一批控制性停电名单^[4]。2 月 19 日 10:00AM，EEA 降至 2 级，11:00AM 降至 1 级，ERCOT 宣布已有足够的发电容量恢复受控制性停电影响的电力服务^[5]。2 月 20 日，得州停电用户数低于 10 万，恢复了峰值停电规模中 98% 用户的供电，ERCOT 发电容量运行备用裕度达到正常水平^[6]。2 月 21 日，ERCOT 取消了所有与寒冷天气相关的运行条件通告^[7]。

2.3 事故期间电力市场运行状况

2.3.1 PUCT 下发市场命令

2 月 15 日，负责监管 ERCOT 电力市场的得州公用事业委员会(public utility commission of Texas, PUCT)下发紧急命令^[20-21]，指出 EEA3 事故中发现的 2 个重大市场异常情况：

1) 切负荷事故中电价低于全系统报价上限(system-wide offer cap, SWOC)。

PUCT 认为，由于采取轮流停电措施，负荷减少，导致 2 月 15 日系统能源价格一度低至 1 200 美元/(MW·h)，这与市场设计的初衷不符。能源价格应当反映供应的短缺，一旦发生切负荷，意

味着稀缺度达到最大，市场价格也应该达到最高，即 SWOC。因此，PUCT 授权 ERCOT 在安全约束经济调度中将 EEA3 级已削减负荷还原到实际负荷中，由此更正 RTRDPA，该算法在 2 月 15 日 22:15 正式生效。

2) 燃料价格飙升导致低报价上限(low cap, LCAP)异常。

ERCOT 市场规则中，为了保护消费者免受尖峰价格影响，当发电高峰时段累计净利润(peaker net margin, PNM)达到每年 315 000 美元的阈值时，系统报价上限将设置为 LCAP，其计算公式如下：

$$L_{CAP} = \max \{2\,000, 50 \cdot P_{GAS}\} \quad (4)$$

式中 P_{GAS} 为天然气价格。

寒潮事故中，得州天然气价格飙升，由式(4)计算得到 LCAP 将超出 9 000 美元/(MW·h)的高报价上限(high cap, HCAP)，与规则设计矛盾。因此，PUCT 命令 ERCOT 在达到 PNM 阈值时，暂停使用 LCAP，继续将 HCAP 作为 SWOC。实际运行中，ERCOT 在 2 月 17 日 PNM 超过阈值，达到 445 900 美元。

2.3.2 部分 QSE 产生欠款

2 月 18 日，ERCOT 宣布 2 家授权计划实体(qualified scheduling entities, QSE) Griddy Energy LLC 与 MQE LCC 分别欠款 118 万、37 万美元^[22]。ERCOT 年度预算资金仅足够支付系统成本，无法为市场参与者兜底欠款，于是开始采取动用市场主体担保金、调整交易对手押金等财务措施填补欠款。2 月 21 日，PUCT 召开紧急会议，要求 ERCOT 行使酌情处理权，延迟结算，并确保未缴费的用户不断电^[23]。2 月 22 日，根据得州政府要求，ERCOT 暂停结算。2 月 23 日，经 PUCT 授权，ERCOT 准备利用高达 4 亿美元未分配的阻塞收益权拍卖收入以帮助履约，保护金融电力市场的流动性。

3 事故初步分析

在此次事故中，停电背后的供需失衡、资源稀缺下的电价上涨、高昂账单衍生的财务危机成为引人关注的主线问题。事故发生后，ERCOT

及美国 DOE、PUCT、EIA 等部门发布了实时的报告及有关评论报道,根据相关材料对3个主线问题初步分析如下。

3.1 全系统的供需不平衡

1) 极寒天气导致电力需求激增。

ERCOT 的冬季需求高峰很大程度上取决于该地区大城市负荷中心的温度指标^[13]。根据历史天气数据,ERCOT 四大城市冬季寒冷水平划分标准如表1所示。

表1 不同寒冷水平四大城市温度指标

Tab.1 Temperature indicators of four major cities in different cold levels °C

寒冷水平	达拉斯	奥斯丁/圣安东尼奥	休斯顿
正常	-6.7	-3.3	-1.1
低温	-9.4	-6.1	-3.9
极寒	-12.2	-6.7	-6.7

2月15日,达拉斯最低气温为 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$,奥斯丁/圣安东尼奥最低气温为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$,休斯顿最低气温为 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$,均达到极寒标准。由于高度市场化带来的低电价,得州大约60%的家庭使用电制热设备,因此当多地同时启动暴风雪预警时,冬季电力负荷迅速攀升。图5为2月14—20日负荷预测与可用容量的对比图。可以看出,可用容量在2月15日午夜后下降到ERCOT的日前负荷预测以下,负荷削减从2月15日起持续至18日,最高峰时达到20GW。据统计,2月15日实际负荷与负荷预测之间的差值扩大到30GW以上,到2月17日缩小为略低于20GW^[24]。

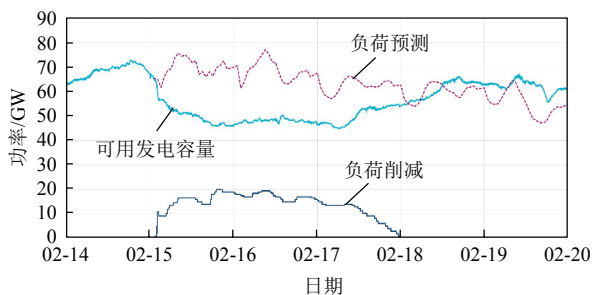


图5 负荷预测与可用容量

Fig. 5 Estimated load and available generation

2) 大量机组停运致使电力供应减少。

得州用电高峰通常出现在夏季,2020年最大负荷发生在8月15日,达到73821MW;历史最大负荷发生在2019年8月12日,达到74820MW。

因此,大部分发电设施有良好的设计应对夏季酷暑高温,但并无设计应对极端严寒天气。是否为发电机组加装防冰冻设施取决于发电机组所有者,得州没有任何法律要求发电机组加装此类设施^[25]。寒袭之下,发电设备机械故障频发;天然气井口冻结,输气管道压缩机功率下降,严重破坏了天然气电厂的燃料供应;涡轮机结冰、云层覆盖分别导致风力发电、太阳能发电低于正常水平。图6为事故期间各类型发电资源的停运容量。

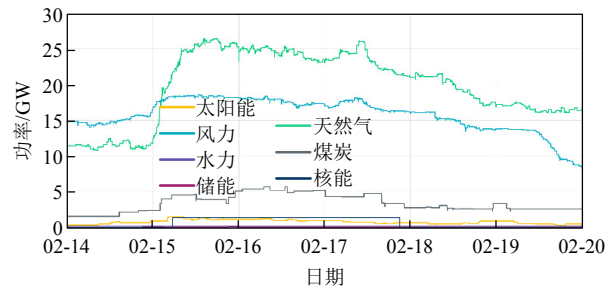


图6 各类型发电资源停运容量

Fig. 6 Outage capacity of various types of power generation resources

由图6可知,主要燃料类型机组在事故期间均发生不同程度的发电功率损失,其中燃气机组停运容量在2月15日急剧增加,超过风电并维持在高值。系统瞬时最大离线容量为52277MW,约为总装机容量的48.6%。与2月14日相比,2月15—16日燃气出力下降约15GW,风电出力下降约4GW,煤电出力下降约3GW,核电出力下降约1GW。ERCOT为冬季峰荷预期计划的发电容量总计85GW,其中87%为火电,9.7%为风电,1%为太阳能^[25]。在可再生能源低出力、火电全部可用的容量预期计划中,37%的火电机组停运,20%的可再生能源发电机组停运。

3) 毗邻电网支援能力有限。

ERCOT 与美国东部电网、墨西哥存在直流联络,但是在事故期间,毗邻电网同步出现供不应求或满发状况。图7为ERCOT与外部地区的电力交易情况(负值为进口)。

美国东部时间2月15日,同样遭受高负荷与极寒天气影响,SPP范围内部分发电机组停机;06:00AM,SPP发出EEA,并于16日上升为3级,随后开始削减负荷^[2]。因此,SPP作为ERCOT最主要的电力进口区,交易量出现明显波动,一

度降低为零。在得州天然气出口禁令和能源出口通道运行不畅的影响下，高度依赖美国天然气供应的墨西哥也出现停电情况，基本无法向 ERCOT 提供电力支援。

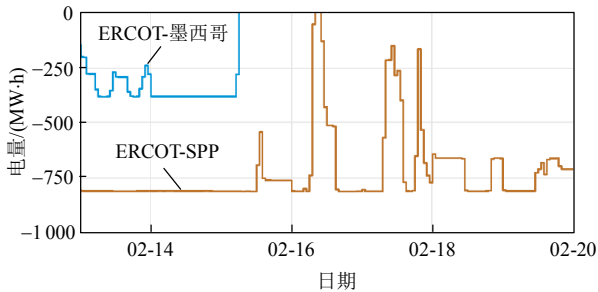


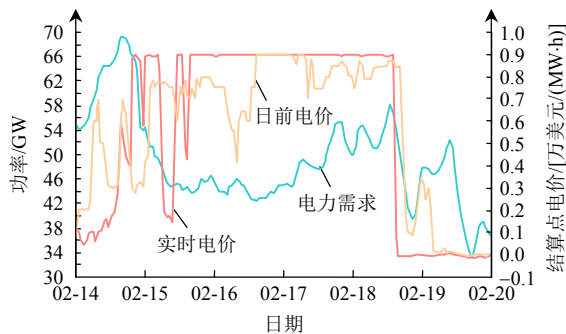
图 7 电力交易

Fig. 7 Power interchange

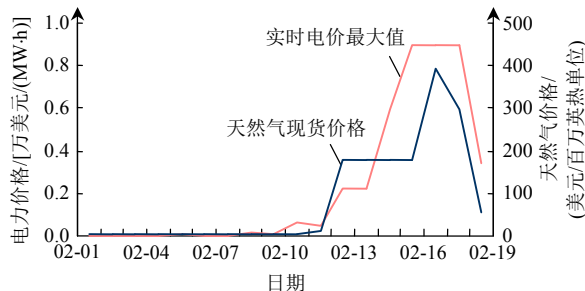
3.2 批发市场中的高电价

由于发电厂具有投资大、回收周期长等特点，得州采用稀缺定价机制在市场环境中激励相关机构、主体主动进行投资。如 1.2 所述，得州电力批发市场中结算点电价由节点边际价格和价格增量 2 部分组成。当系统可靠性不足时，价格增量变大，结算点电价提高，最终达到失负荷价值的电价上限。

在 PUCT 行政指令的调整下，事故期间市场价格表现如图 8 所示。其中：图 8(a)展示了电力



(a) 电力需求与批发电价



(b) 电力价格与天然气价格

图 8 市场表现

Fig. 8 Market performance

需求变化时，HB_Houston 结算点每小时电价的波动情况；图 8(b)则给出了 ERCOT 每日实时电价最大值与休斯顿航道天然气现货价格的对比。

由市场表现结果可知，本次事件的尖峰电价是一种受控的高电价。当 ERCOT 采取切负荷措施时，系统实际负荷减小，日前、实时市场电价呈反直觉上涨，多次达到上限 9000 美元/(MW·h)。在得州电力市场设计中，受控的高电价符合稀缺定价理念，有效反映了市场供需的价值。一方面在 9 美元/(kW·h)的激励下，所有发电主体会尽量将其发电资源保持在可用状态，面临高电价的售电公司和终端用户会采取尽可能的措施降低其代理用户或自身非必要用电，有助于尽快缓解紧急状态。另一方面，根据市场规则，当天然气价格一度飙升至接近 400 美元/百万英热单位时，电力市场最高限价可以达到将近 20000 美元/(MW·h)，而 PUCT 及时采取措施，可使最高限价一直维持在 9000 美元/(MW·h)，避免用户承担超出失负荷价值的用电成本。

3.3 零售侧产生的财务危机

得州电力市场售电侧开放竞争，目前存在超过 160 家 QSE。大部分小企业、居民通过固定费率套餐锁定零售电价，受批发电价飙升的影响不大。得州约有 2.9 万用户选择了指数型零售套餐，该模式根据批发电价收费，客户需承担现货市场敞口的定价风险。2019 年，得州电力市场批发电价平均为 38 美元/(MW·h)^[26]，而事故期间尖峰电价是其 236 倍。本次事件中，采用指数型零售套餐的用户收到巨额账单，部分售电公司发生欠款；而个别未采用此套餐，无法将费用转嫁给用户的售电公司则甚至申请了破产保护，产生了较严重的财务危机。

稀缺定价机制必须配套完善的价格风险、财务风险管控机制。分析此次出现的财务问题，重要原因便是市场主体没有预估到可能的风险，或者未采取有效的规避措施。指数型套餐相当于将终端用户暴露在批发市场中，一旦缺乏足够的风险管控能力，就会在极端事件中受到稀缺定价的冲击。当市场不够成熟时，市场主体专业度不足，且由于极端事件下系统运行、市场运营方面的复

杂性,无法清晰意识到可能面临的各种风险。在此基础上,若用户(包括售电公司和终端用户)未签订对冲风险的合约等套保产品,就会出现高电价无法负担的情况。

4 对我国电力市场建设的启示

1) 做好电力系统规划,提前布局电力供给。

若发电机组未发生故障停运,事故期间负荷预测达到峰值时,ERCOT总容量裕度约为28%,即使在冬季降额容量预期计划中,系统也存有约9%的裕度。发电容量的充裕度并不是此次得州电力危机的核心原因,但仍然暴露出电力供给无法应对小概率事件的问题。进一步来说,停电背后北美极地涡旋的频繁产生,实际上是温室效应、全球变暖的后果。随着气候环境的变化,极端自然灾害的影响也应纳入电力规划的考量。我国电力市场改革正处于试点推进期,能源供给侧的宽裕是市场化转型和市场平稳运行的前提。因此,应当在电力系统规划中提高应对极端事件的能力。主网规划层面,无论是对电网规划还是对电源规划,都要考虑极端事件下多个、多种设施同时出现问题的可能性,提前制定应对措施,确保电网建设适度超前于电源建设、电源建设适度超前于经济社会发展;配网层面,要加强停电管理能力的建设,在出现类似的计划停电的情况时,能够较好地实现轮流停电,避免部分区域长时间停电;整体协调方面,提高部分地区出现紧急事件时大范围的资源协调能力。

2) 加强需求侧管理,提高用户响应水平。

本次停电事故中,ERCOT呼吁用户通过减少大型电器使用、断开未使用电气设备等方式减少电力需求,加上稀缺电价信号的影响,实际需求响应量高于年度平均水平。类似地,2020年美国加州“8·14”停电中,加州ISO发布警告呼吁用户通过错峰等措施节约用电,同时启动需求侧响应缓解供需矛盾^[27]。在提升系统平衡能力的过程中,市场价格对发电侧投资的激励是长期效应,短期而言迫切需要允许需求侧参与市场,提高用户响应水平。电力负荷的价格弹性较小,当系统供应紧张时,容易导致批发电价大幅上涨,引发

市场力问题。我国电力市场设计应尽快建立需求侧响应机制,促进批发市场价格信号合理传导至终端用户,鼓励用户在供应紧张时少用电、供应充裕时多用电,提升电力系统平衡能力。

3) 重视高可再生能源比例下的发电容量充裕度问题,建立长期可持续的市场机制。

近年来,得州市场煤电份额持续下降,而在停电事故中,煤电正常运转受寒潮影响是最小的。随着电力市场深化改革,现货电价将向发电边际成本回归,作为系统边际机组的火电机组难以回收投资成本。同时,高比例可再生能源发电将减少火电利用小时数、压低现货市场电价,对传统能源机组的收益带来减损,不利于电源长期投资。我国应尽快完善促进传统能源机组回收成本的机制,在全国用电量同比增长的同时保持可调节火电比例不降低,确保在极端情况下火电发挥兜底支撑作用。

目前,发电容量充裕度机制的重要性已在我国得到广泛关注,但大多是基于当前供需情况、市场建设情况、政策环境设计的,未充分考虑未来发展的需求。发电充裕度机制主要是解决长期发展的问题,必须考虑电力系统、能源系统长期可持续的发展。因此,需要在对现有理论、经验进行系统、全面分析的基础上,建立适应我国国情的发电容量充裕度机制发展路径。首先要确立目标机制(稀缺定价、容量市场等),即在相关配套政策、机制都比较完善的情况下比较理想的机制,然后制定从当前情况过渡到目标机制的路径。

4) 加强电力市场风险分析和管控。

ERCOT电力市场在事故期间一直处于正常运转状态,电价暴涨实际上是电能真实价值的反映,而部分售电商引发的金融危机则体现了极端动态定价模式的弊端。电力市场的模式没有绝对的优劣之分,关键需要做足通盘、全面的考虑,配套管控机制查漏补缺。我国电力市场改革应当允许价格适度波动,促进价格体现电能的时空价值,引导各种资源自发调整市场行为,优化社会总福利。另一方面,应当建立健全配套机制,加强风险分析和管控。首先,市场运营机构要提前对潜在风险进行分析,并向市场主体发布提示,

必要时设计一些标准的风控产品，强制相关市场主体购买；其次，通过中长期及短期不同时间尺度的充裕度评估、市场的预出清等，使市场主体可以充分认识到相关风险，尽早制定应对措施；最后，加强信息披露，尽量消除信息不对称问题，避免部分市场主体通过市场力人为抬高电价。

5) 完善极端事件应急响应程序，规范政府干预机制。

ERCOT 在本次事故的应对中，基于能源紧急警报机制按步骤执行应急响应程序，从全系统角度尽量减少了损失。市场方面，PUCT 通过行政指令的干预有效解决了 2 个重大异常情况，避免了情况的恶化。整体上，得州相关部门在授权允许范围内严格贯彻了既定的规则、法例，但是由此也暴露出另一层面的问题，即规则本身是否合理、机制本身是否完善。

电力除了商品属性，还具有必需品属性。预防“百年一遇”极端事件的可靠性部署成本或许是全社会难以承受的，但是制定渐进性、针对性、可行性兼备的应急响应程序则可以做到临危不乱，减小可控制的损失。在完善应急响应程序的基础上，我国需要充分吸取美国等市场化程度较高国家的经验，结合国内政治、经济体制的优势，研究建立规范化的、灵活性的极端事件下的政府干预机制，做到既尽量减小极端事件对民众、社会的影响，又保持市场规则的严肃性，促进电力系统长期可持续发展。

5 结论

得州“2·15”轮流停电是极端寒冷、燃料停供、机组停发等相关因素叠加的结果；事故期间电力市场运行发生了局部不符合设计初衷的异常状况。我国在迈向“3060”碳达峰、碳中和目标的进程中，应当提高能源转型背景下应对重大突发事件的能力。为了吸取此次事故相关经验教训，梳理了停电前兆、轮流停电、恢复供电的全过程，并初步分析了系统供需不平衡、批发侧电价暴涨、售电侧财务危机三大主流关注问题。此次得州停电的经验和教训表明，我国应做好电力系统布局规划，提高需求侧响应水平，建立长期可持续的

发电容量充裕性机制，加强电力市场风险分析和管控，完善具有中国特色优势的政府干预机制，防止类似事故的发生。

参考文献

- [1] 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_REVISIED_ERCOT_Presentation.pdf.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 国务院. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见[EB/OL]. (2015-03-31)[2021-02-23]. <http://news.ncepu.edu.cn/xxyd/llxx/52826.htm>.
State Council. Several opinions on further deepening the reform of the power system[EB/OL]. (2015-03-31)[2021-02-23]. <http://news.ncepu.edu.cn/xxyd/llxx/52826.htm>.
- [9] IMM for ERCOT. 2019 state of the market report for the ERCOT electricity markets[R]. Texas: IMM for

- ERCOT, 2020.
- [10] 惠海龙, 于兴斌, 李永刚. 美国德州电力市场综述[R]. 广州: 南方能源观察, 2014.
HUI H L, YU X B, LI Y G. Overview of Texas electricity market[R]. Guangzhou: EO, 2014.
- [11] 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(6): 37-43.
ZHU J Z, YU Y, XIE P P. Scarcity pricing of United States and its enlightenment to China[J]. Southern Power System Technology, 2019(6): 37-43.
- [12] ERCOT. ERCOT energy emergency alert communications matrix[R/OL]. Austin: ERCOT, 2021. http://www.ercot.com/content/wcm/lists/226525/ERCOT_Energy_Emergency_Alert_Communications_Matrix_October_2020.pdf.
- [13] ERCOT. ERCOT's use of energy emergency alerts [R/OL]. Austin: ERCOT, 2021. http://www.ercot.com/content/wcm/lists/226525/EEA_OnePager_updated_9-4-20.pdf.
- [14] ERCOT. Energy emergency alert (EEA) tools [R/OL]. Austin: ERCOT, 2021. http://www.ercot.com/content/wcm/lists/226525/EEA_Tools_OnePager_Winter_2021_2-13-2021.pdf.
- [15] DOE. ERCOT 202(c) request letter[EB/OL]. (2021-02-14)[2021-02-23]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/02/f82/ERCOT%20202%28c%29%20Emergency%20Order%20Request%20-%202002.14.2021.pdf>.
- [16] DOE. Order No.202-21-1[EB/OL]. (2021-02-14)[2021-02-23]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/02/f82/DOE%20202%28c%29%20Emergency%20Order%20-%20ERCOT%20202.14.2021.pdf>.
- [17] ERCOT. Extreme cold weather expected to result in record electric use in ERCOT region [EB/OL]. (2021-02-11)[2021-02-23]. <http://www.ercot.com/news/releases/show/224996>.
- [18] ERCOT. Grid operator continues to restore power [EB/OL]. (2021-02-17)[2021-02-23]. <http://www.ercot.com/news/releases/show/225696>.
- [19] ERCOT. Grid operator restores more power overnight [EB/OL]. (2021-02-17)[2021-02-23]. <http://www.ercot.com/news/releases/show/225369>.
- [20] ERCOT. PUC order directing ERCOT to take action regarding market prices[R/OL]. Austin: ERCOT, 2021. <http://www.ercot.com/content/wcm/lists/225213/51617WinterERCOTOrder.pdf>.
- [21] ERCOT. Second PUC order directing ERCOT to take action regarding market prices[R/OL]. Austin: ERCOT, 2021. http://www.ercot.com/content/wcm/lists/225346/51617_2nd_Winter_ERCOT_Order.pdf.
- [22] MSN. Texas deep freeze delivers Macquarie \$210 million windfall[EB/OL]. (2021-02-23)[2021-02-23]. <https://www.msn.com/en-us/news/finance-companies/texas-deep-freeze-delivers-macquarie-dollar210-million-windfall/ar-BB1dSXSS>.
- [23] PUCT. PUC emergency actions to protect Texas electricity customers[R/OL]. Austin: PUCT, 2021. <https://www.puc.texas.gov/agency/resources/pubs/news/2021/PUCTX-REL-COLD21-022121-EOM.pdf>.
- [24] EIA. Extreme winter weather is disrupting energy supply and demand, particularly in Texas [EB/OL]. (2021-02-19)[2021-02-23]. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=46836>.
- [25] HAO Z. 2021 Texas power outages: facts and initial thoughts[R]. Austin: The University of Texas at Austin, 2021.
- [26] 国网能源研究院有限公司. 2020 国内外电力市场化改革分析报告[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020: 16-23.
State Grid Energy Research Institute Co., Ltd. 2020 Analysis report of domestic and foreign electricity market reform[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2020: 16-23.
- [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 J, TU J Z, SUN W M. Preliminary analysis and lessons of California Power outage events on August 14 and 15, 2020[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4471-4478.

收稿日期: 2021-02-25。

作者简介:



刘泽扬

刘泽扬(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场、能源政策, 386365567@qq.com;



荆朝霞

荆朝霞(1975), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场、电动汽车、电力系统运行与控制、综合能源网建模、优化与决策等, 本文通信作者, zxjing@scut.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)