

# 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

罗旭<sup>1</sup>, 马珂<sup>2</sup>

(1. 得克萨斯州电力可靠性委员会, 美国 得克萨斯州 奥斯丁市 78744;

2. 国家电力调度通信中心, 北京市 西城区 100031)

## Experience and Enlightenment in Operations of Wind Generation in ERCOT Grid

LUO Xu<sup>1</sup>, MA Ke<sup>2</sup>

(1. The Electric Reliability Council of Texas, Inc., Austin, Texas 78744, USA;

2. National Electric Power Dispatching and Communication Center, Xicheng District, Beijing 100031, China)

**ABSTRACT:** ERCOT region has witnessed the booming of wind generation development in recent years and leads the U.S. with the most installed wind generation capacity. ERCOT has gained rich experience in operations of wind generation. This paper introduces wind power forecast, and day-ahead and real-time operations of wind generation in ERCOT nodal power market. ERCOT's emergency operations in wind related events are also presented. The paper is concluded with a summary of ERCOT's experience that can be learned to improve operations of wind generation in China.

**KEY WORDS:** Electric Reliability Council of Texas (ERCOT); power grid; wind generation; operation and administration

**摘要:**近年来,美国得克萨斯州电力可靠性委员会(electric reliability council of Texas, ERCOT)在风电调度运行管理方面积累了丰富的经验。该地区电网风电发展迅猛,风电装机容量位居美国各州首位。主要介绍了在 ERCOT 地区电网电力市场模式下风电的功率预测、日前和实时调度运行以及 ERCOT 地区电网应对风电紧急事件的实例,并对我国可借鉴的 ERCOT 地区电网调度运行风电经验进行了总结。

**关键词:**美国得克萨斯州电力可靠性委员会; 电网; 风电; 调度运行管理

## 0 引言

截至 2009 年底,全国大陆地区的并网风电装机容量已达 25.8 GW,连续 4 年翻番增长<sup>[1]</sup>。由于当前风电开发主要集中在华北、东北、西北地区,所以在北方个别电网中风电装机容量已占到了总装机容量的 10%以上,风电接入的规模和比例均处于世界前列。但在这些电网中,风电大规模集中接入引发的电网阻塞和调峰调频困难,已成为

调度机构目前面对的主要挑战<sup>[2]</sup>。所以,亟需在现有发电调度运行管理体系中引入一些成熟且适用于我国风电开发特点的调度运行管理技术与经验,以保障电网安全稳定运行,达到可再生能源消纳的要求。

作为风电开发的起源地,西欧因为地域狭小、负荷及网架密度大,所以风电并网的主要形式是分布式接入负荷区内部或边缘的中低压电网<sup>[3]</sup>。我国幅员辽阔,用电负荷主要分布在中东部和发达城市及其周边地区,而风电则集中分布在电网薄弱、负荷极轻的偏远地区,所以需要主网架远距离送出风电<sup>[4-5]</sup>。在西欧的电源结构中,燃气、水电和抽水蓄能等具备快速调节能力的机组比例高。我国的电源结构则以调节速度较慢的燃煤蒸汽轮机为主,所以欧洲的风电调度运行管理经验并不完全适合我国。

美国得克萨斯州是美国本土面积最大的州,位于美国本土南部,处在落基山脉南缘和墨西哥湾之间,地形以平原为主,风能资源富集。图 1 为得克

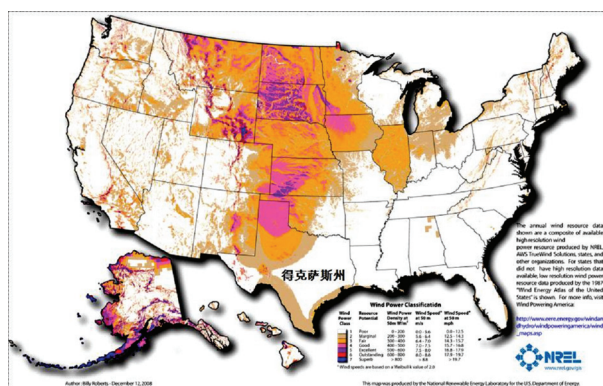


图 1 美国各州 50 m 高度的风能资源情况

Fig. 1 Wind resource distribution of the United States

萨斯州及美国其它各州风能资源分布情况。截至2009年底,得克萨斯州风电装机容量已达9.41 GW,占全美风电装机容量(容量为35 GW)的26.9%,位居各州首位,远大于排名第2的爱荷华州(容量为3.67 GW)和第3的加利福尼亚州(容量为2.72 GW)<sup>[6]</sup>。得克萨斯州的风电主要分布在偏远西部,负荷则主要集中在北部、东部和南部,风电送出主要通过345 kV和138 kV输电线路。风电装机比例在2009年底达到11.2%。

由于历史和政治架构的原因,得克萨斯州的电力体制较特殊。该州大部分县市的电网组成一个交流同步电网,与外界只通过小功率直流联络线联网。这个电网被得克萨斯州公用事业主管部门——得克萨斯州公用事业委员会(Public Utility Commission of Texas, PUCT)授权给得克萨斯州电力可靠性委员会(Electric Reliability Council of Texas, ERCOT)调度运行管理,故该电网称为ERCOT电网。ERCOT电网覆盖得克萨斯州75%的地域和85%的负荷。因为风电开发和送出的情况与我国风电装机容量较大的区域或省级电网相似,所以本文将主要介绍美国得克萨斯州ERCOT电网在风电功率预测、日前和实时调度运行以及应对与风电相关的紧急事件的规则和经验,以期为我国风电调度运行管理提供参考。

## 1 ERCOT 电网简介

截至2009年底,ERCOT电网的发电装机容量约84 GW,在2009年实现发电量约308 TW·h。图2为2009年ERCOT电网的电源结构和发电量结构<sup>[7]</sup>。

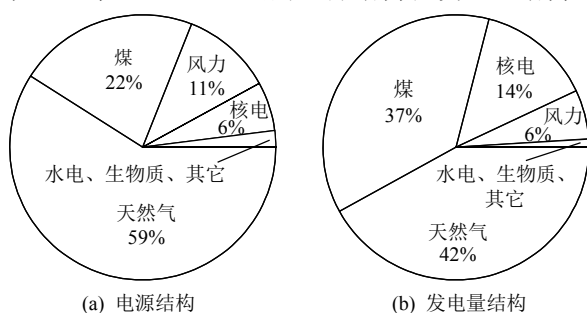


图2 2009年ERCOT电网的电源结构和发电量结构

Fig. 2 Composition of installed capacity and energy production by fuel type of ERCOT grid in 2009

ERCOT电网与美国东部同步互联电网和墨西哥电网通过4个直流背靠背换流站和1个可变频变压器站联网,输电容量合计约1 GW。由于联络线交换功率很小且基本可控,所以ERCOT电网的自动发电控制模式为定频率控制。

ERCOT电网中的高压输电线路有69 kV、138 kV、345 kV 3个电压等级,截至2009年底的高压输电线路长度合计约64 900 km<sup>[7]</sup>。为进一步促进风电开发,实现风电场与输电走廊的协同规划,ERCOT电网在得克萨斯州西部规划了5个竞争性可再生能源区(competitive renewable energy zones, CREZ),并计划在2013年底前建成总长约3 700 km的多条345 kV线路,以满足当地18.5 GW风电装机容量的送出需求<sup>[8-9]</sup>。

ERCOT电网因纬度较低,每年的用电高峰都出现在夏季,目前出现过的最大用电负荷发生在2010年8月23日下午,其值达65.8 GW。ERCOT电网的日用电负荷曲线在多数季节里是单个高峰的形态,但在冬季却为早晚双高峰形态。

ERCOT电网风电出力的反调峰特性明显,日最大出力多在夜间,目前出现过的最大风电出力发生在2010年6月12日夜,其值达7.0 GW,占到当时全网用电负荷的15.8%。图3为ERCOT电网2010年冬夏2个典型日的用电负荷和风电出力曲线。

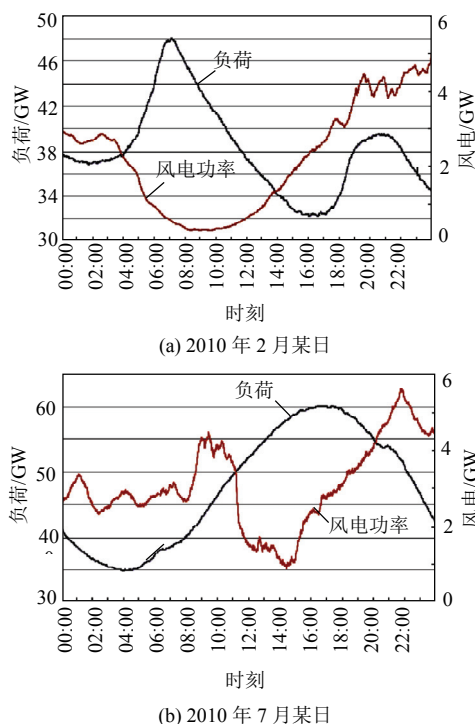


图3 ERCOT电网典型日的负荷与风电功率  
Fig. 3 Typical day load and wind power curves of ERCOT grid

## 2 ERCOT 电网的运行机制

### 2.1 电力市场体系

ERCOT电网目前以批发电力市场模式运行。

1996年,在得克萨斯州公用事业委员会主导下,ERCOT由一家电力可靠性技术服务机构改制成美国第一个独立电网调度机构(independent system operator, ISO),开始运行ERCOT电网和批发电力市场。2001年,ERCOT将网内的10个平衡控制区合并成一体,并开始按区域模式(zonal market)运行批发电力市场。从2010年12月1日起,为提高电力市场运行和电网调度运行的协调性,使阻塞成本的分摊更透明,ERCOT批发电力市场由区域模式改为节点模式(nodal market)<sup>[10]</sup>。

在ERCOT批发电力市场中,市场成员按功能角色被分为5种,如表1所示。市场交易的产品主要包括电能、辅助服务和阻塞收入权(congestion revenue rights, CRR)。交易的途径主要包括双边合同协议、阻塞收入权拍卖、日前市场、补充辅助服务市场和实时市场。

表1 ERCOT市场成员的功能角色

Tab. 1 Role of ERCOT market participants

市场成员	功能角色
资源实体	发电企业和可作为调度资源的负荷用户
负荷服务实体	电力零售公司
电力交易者	不拥有发电资源和负荷的中间交易商
授权计划实体	拥有资源实体或负荷服务实体,或仅为二者的代理机构,向ERCOT提交报价和运行计划,接受ERCOT调度指令
输配电服务提供者	电网企业

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。其中运行时段又分为时前运行小时和实时运行小时,如表2所示。风电场与其它常规电厂一样,通过其授权计划实体(qualified scheduling entities, QSE)来参与这3个时段的市场交易和电网调度运行。

表2 ERCOT日前、调整、运行时段的设置

Tab. 2 Timing of ERCOT day-ahead period, adjustment period and operating period

时段	开始时刻	结束时刻
日前时段	前一日 06:00	前一日 18:00
调整时段	前一日 18:00	运行日 X-1 时
时前运行小时	运行日 X-1 时	运行日 X 时
实时运行小时	运行日 X 时	运行日 X+1 时

## 2.2 日前时段的运行

ERCOT在日前时段主要运行日前市场和日前可靠性机组组合(day-ahead reliability unit commitment, DRUC)。日前市场的清算时间是运行日前一日的10:00—13:30。ERCOT在之前的06:00通过交易系统公布次日的负荷预测和辅助服务需

求。各电厂据此通过交易系统提交次日可出售的电能和辅助服务报价。竞价交易通过以安全约束机组组合(security constrained unit commitment, SCUC)为内核的清算程序进行清算,在13:30公布出清结果。

日前市场出清后1h内,电厂根据出清结果更新运行计划中次日的部分并通过交易系统上报。运行计划的内容包括当前时刻开始的168h内每h每台机组预期的状态、发电能力和辅助服务可提供量,其中发电能力为机组的最大和最小出力限值。

日前市场出清1h后的14:30,ERCOT根据各厂上报的运行计划开始进行名为日前可靠性机组组合的SCUC,对次日开机方式进行校核调整,以满足系统发电容量要求和电网安全约束。与日前市场的SCUC清算程序相比,该SCUC使用负荷预测结果而不是购电出清量作为负荷边界条件,同时剔除了市场成员进行虚拟电力交易的干扰,这对保障电网安全运行的意义更大。

ERCOT在16:00公布根据日前可靠性机组组合校核调整后的次日开机方式,各电厂据此调整自己的运行计划,并在日前时段于18:00结束前通过交易系统上报。

## 2.3 调整时段的运行

调整时段主要用于ERCOT调整开机方式和电厂调整运行时段报价及运行计划。ERCOT在调整时段根据运行情况的变化,评估在日前时段安排的辅助服务是否满足电网安全运行要求,如不能满足,将随时通过交易系统启动补充辅助服务市场,组织各方在调整时段结束前达成补充交易。电厂在这一时段也根据运行情况变化,评估在日前时段制定的竞卖报价、发电和辅助服务安排在经济和技术上的可行性。如不可行,将修改报价和运行计划,并在调整时段结束前通过交易系统上报。

## 2.4 运行时段的运行

运行时段长2h。在运行时段的前1h,即时前运行小时里(X-1时至X时),ERCOT将进行名为时前可靠性机组组合(hourly reliability unit commitment, HRUC)的SCUC,根据最新获得的网络拓扑结构、母线负荷预测结果、设备故障和检修计划对各厂调整时段上报的运行计划进行校核调整,覆盖时段包括实时运行小时(X时至X+1时)以及之后的运行日剩余小时。如果此时针对次日的日前可靠性机组组合的结果已出,覆盖时段还将包括次日的所有小时,以调整该日前可靠性机组组合的结果。ERCOT

在实时运行小时开始之前公布时前可靠性机组组合的校核调整结果。

在运行时段的后 1 h, 即实时运行小时里, ERCOT 主要运行实时序列(real time sequence, RTS)、安全约束经济调度(security constrained economic dispatch, SCED)和负荷频率控制(load frequency control, LFC)3 个程序, 以维持电网频率和电网安全, 并对在线机组进行经济调度。需要说明的是, 这 3 个维系电网实时运行的程序使用的信息都是 SCADA 系统实时采集的数据, 其中机组信息主要包括当前机组状态、发电机出力、最大和最小出力限值、辅助服务可提供量和已调用量等。

RTS 程序每 5min 运行 1 次, 根据网络拓扑结构、SCADA 信息、母线负荷预测结果和状态估计结果, 进行当前态和预想事故态的网络安全分析。

SCED 程序也是每 5min 运行 1 次, 根据交易系统中各电厂在调整时段末的最新报价、SCADA 系统中各机组运行限值和 RTS 程序分析的网络安全限额, 以在满足功率平衡、电网及机组运行安全约束的情况下追求成本最小为目标, 计算生成机组运行的基点指令(base point)和机组发电的节点边际价格(locational marginal price, LMP)。

LFC 程序每 4s 运行 1 次, 在正常情况下调用向上和向下调节备用以实现二次调频, 并在电网频率异常情况下调用旋转备用, 以恢复频率。此外, 该程序还负责监视辅助服务容量是否满足一定的裕度。

### 3 风电功率预测

在日前时段、调整时段以及运行时段的时前运行小时里, ERCOT 主要根据电厂上报的运行计划信息, 进行日前可靠性机组组合和时前可靠性机组组合计算, 以实现开机方式的校核调整, 确保电网调度运行中有充足的可调发电容量和辅助服务容量。

运行计划中的机组或电厂最大出力限值是这 2 个机组组合计算中最重要的输入数据之一。由于风电场最大出力限值需通过风电功率预测获得, 所以其预测精度直接影响电网的安全运行水平和风电场交易风险高低。早先, ERCOT 电网内各风电场自行预测风电功率。因发生过由于部分风电场预测水平差而影响电网安全运行的事件, 各风电场与 ERCOT 达成集体协议, 由风电预测服务商统一为各方提供短期风电功率预测服务, 各风电场通过 ERCOT 交易系统获得每 h 更新 1 次的未来 0~48 h

本场每 h 平均出力预测值, 具体的预报情况如图 4 所示。

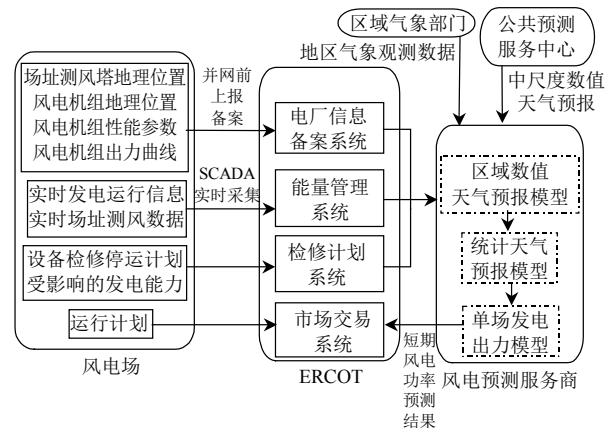


图 4 ERCOT 风电功率预测系统

Fig. 4 Wind power forecast system of ERCOT grid

为预测风电功率, ERCOT 电网中的风电场须向 ERCOT 及时提供可信的 3 类信息, 其中背景信息包括风电机组和测风塔的地理位置、风电机组性能等, 运行信息包括实时发电出力、测风数据等, 检修信息包括机组等设备的检修停运情况及其对发电能力的影响等。

风电预测服务商定时接收由 ERCOT 汇总发出的上述 3 类信息, 结合由公共预测服务中心提供的中尺度数值天气预报、区域气象部门提供的地区气象观测数据, 根据其区域数值天气预报模型、统计天气预报模型和单场发电出力模型对每个风电场进行风电功率预测。数值天气预报模型是基于 3D 网格的微分方程, 用于模拟基本大气数据的变化过程。公共预测服务中心的此类模型尺度大、分辨率低, 风电预测服务商的专业预测模型小地区适应性和分辨率更高, 特别是对接近地表的风运动模型的配置更加优化。它以中尺度数值天气预报为初始场, 结合地区气象观测数据, 以 1—6h 的频率滚动仿真计算。统计天气预报模型是由历史数据训练得到的经验公式。它以风电场的实时和历史功率以及气象数据为输入, 结合地区气象观测数据, 以 1 h 的频率进行更高空间分辨率的仿真, 矫正区域数值天气预报模型的系统误差。单场发电出力模型描述的是气象变量与风电场发电出力之间的关系, 一般根据风电场的具体特点由统计模型或物理模型确立, 并考虑设备检修停运等方面的影响<sup>[11-12]</sup>。

## 4 风电的市场参与和调度运行

### 4.1 风电场的市场行为特点

在 ERCOT 批发电力市场中, 风电场与其它常

规电厂一样, 可通过双边合同协议、日前市场和实时市场参与市场交易, 并承担相应的财务责任。但受风电的固有特性和相关政策的影响, 风电场的市场行为相对常规电厂还存在着以下差异:

1) 由于风电机组可控性有限而不能提供辅助服务, 所以风电场不参与日前市场和补充辅助服务市场中的辅助服务竞卖。

2) 由于风电场可按上网电量享受联邦政府的税收优惠, 并通过得克萨斯州政府的新能源积分项目获得数额可观的补贴收入, 故这些风电场希望尽可能多地发电, 在日前市场和实时市场中的电能竞卖报价往往非常低, 相互之间竞争激烈时甚至提出负报价。

3) 由于来风不确定性大, 风电场的实际发电量与日前交易电量必然存在一定的偏差, 而偏差的电量以实时电价结算, 所以风电场非常重视评估日前交易的风险。

#### 4.2 风电场在日前与调整时段的运行

在 ERCOT 电网中, 风电场在日前和调整时段提交的运行计划中各小时机组最大出力限值必须不大于短期风电功率预测结果。因此, 风电场需在 ERCOT 每 h 发布短期风电功率预测结果之后及时更新其运行计划信息。由于短期风电功率预测结果在日前和时前的可靠性机组组合中采用, 所以预测精度对确保电网运行时可调发电容量和辅助备用充裕水平具有重要意义。针对短期风电功率预测的误差可能造成的系统发电容量不足的风险, ERCOT 确定非旋转备用辅助服务需求时, 主要依据短期风电功率预测和负荷预测的历史误差水平。

#### 4.3 风电场在运行时段的运行

在运行时段前 1 h 进行的时前可靠性机组组合中, 对后 1 h(实时运行小时)的开机方式作最后 1 次校核调整。风电场运行计划中该小时的最大出力限值应为该小时最新的风电功率预测。一旦进入实时运行, 风电场应将最大出力限值设为自身估计的当前能达到的最大功率输出, 通过 SCADA 系统实时传送给 ERCOT 的能量管理系统(energy management system, EMS), 用于计算 SCED 对该风电场的最大调度限值。由于风电场的竞卖报价非常低, 所以在没有网络阻塞的情况下, SCED 程序计算生成的风电场基点指令值将接近于其最大出力限值, 即允许风电场以最大功率发电。而在严重网络阻塞的情况下, SCED 程序计算生成的风电场基点指令值可能

低于其最大出力限值。当基点指令值低于最大出力限值, 且差值大于 2 MW 以上时, 风电场被认为处于弃风状态, 必须按照基点指令来安排发电运行。为让风电场能够确定当次接受到的基点指令对应的 SCED 程序采用的最大出力限值, 进而判断自己是否处于弃风状态, 风电场需在接收到前一个基点指令后的一个 SCADA 周期内更新其最大出力限值, 并在接收到下一个基点指令前保持恒定。

#### 4.4 对风电场基点指令偏差的处罚

在实时调度运行中, 机组或电厂的实际出力是否偏离接收到的基点指令是 ERCOT 对电厂考核的重要项目。对常规机组而言, 其出力超出考虑辅助服务调用的基点指令值 5%或 5 MW(取 2 者中较小值)时, 将受到偏差处罚。考虑到风电可控性差和市场对风电的接纳程度, ERCOT 对风电场的基点指令偏差处罚标准要宽松一些, 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。对风电场出力低于基点指令值的情况, 无论弃风与否, 都不作处罚。这是考虑到风电场一般情况下总是希望满发, 所以风电场出于自身利益会尽量避免出力低于基点指令值的情况。

#### 4.5 与风电场相关的紧急事件的应对

虽然在日前和时前可靠性机组组合计算中采用短期风电功率预测基本可以防御以 h 为尺度的风电功率缺额风险, 但并不能消除大规模风电功率突然减小所带来的风险。针对系统发电容量迅速减小和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, 调用非旋转备用和旋转备用辅助服务以及执行表 3 的紧急电力消减计划来应对<sup>[13]</sup>。

ERCOT 电网的一大特点是有大量的可中断负荷用户通过竞价来承担非旋转备用服务、旋转备用服务, 或与 ERCOT 签订紧急可中断负荷服务(emergency interruptible load service, EILS)合同。调度员可在紧急情况下要求用户执行服务, 断开负荷。此外, ERCOT 电网中大量负荷还安装了低频保护装置, 当电网频率低于 59.7 Hz 时负荷被自动断开, 旋转备用提供服务。

2008 年 2 月 26 日 18:41, ERCOT 宣布执行紧急电力消减计划第 2 级, 以应对当时系统发电容量和电网频率迅速降低的紧急情况, 成功避免了大面积停电事故的发生。由于该事件暴露了风电给电网调度运行带来的风险, 并反映了 ERCOT 应对与风电相关的紧急事件的一些调度运行经验, 所以受到

表 3 ERCOT 紧急电力消减计划

级别	执行条件	执行方案
1 级	系统旋转备用容量裕度小于 2 300 MW。	从 ERCOT 电网外请求功率支援; 通知可用机组启动。
2 级	系统旋转备用容量裕度小于 1 750 MW。	通知承担旋转备用服务的负荷用户断开负荷。
3 级	所有承担旋转备用服务的负荷都被使用, 电网频率不能恢复到 60 Hz。	通知签订紧急可中断负荷服务合同的负荷用户断开负荷。
4 级	电网频率低于 59.5 Hz。	渐进甩掉电网 20% 的负荷。

了北美各调度机构的广泛关注<sup>[14-15]</sup>。

当时 ERCOT 电网在区域市场模式下运行, 各风电场的短期风电功率预测由其自行提供, 并在运行计划中上报。2008 年 2 月 26 日下午至傍晚时段, ERCOT 电网经历了大规模风电功率减小的事件, 而各风电场上报的风电功率预测存在较大误差。虽然负荷于 17:10 开始迅速爬升, 且 1 台常规机组于 17:44 因故障停运, ERCOT 的时前安全校核程序仍然判定 18:00—19:00 系统发电容量充足。18:00 开始, 系统旋转备用容量裕度和电网频率急速下降, 致使 ERCOT 于 18:41 宣布执行紧急电力消减计划第 2 级。事实上, 当时为节点市场模式而设计的集中式短期风电功率预测系统已经在线运行, 并作出了准确预测, 只是没有在调度运行中使用。该事件发生后, ERCOT 决定在区域市场模式运行中采用该集中式预测系统。图 5 显示了该事件中负荷、风电功率预测与实际输出的情况。该事件描述如表 4 所示。

图 6 给出了该事件中电网频率变化、LFC 程序自动调用的机组旋转备用和调度员调用的负荷旋转备用情况。可以看出, 承担旋转备用服务的负荷及时响应捕捉电网频率下降起到了非常关键的作用。

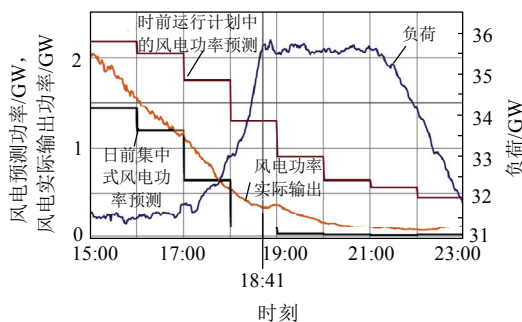


图 5 ERCOT 电网 2008 年 2 月 26 日事件中的负荷、风电功率预测值和实际输出功率  
Fig. 5 Load, wind power forecast and actual wind power output in ERCOT event on February 26, 2008

表 4 ERCOT 电网 2008 年 2 月 26 日事件描述

Tab. 4 Description of ERCOT event on February 26, 2008

时刻	事件描述
15:00	风电功率约 2 000 MW, 之后 3.5 h 内以 8 MW/min 的平均速率持续下降, 至 18:30 风电功率约为 360 MW。
17:10	负荷约 31 600 MW, 之后的 1.5 h 内以约 43 MW/min 的平均速率迅速爬升, 至 18:41 负荷约 35 550 MW。
17:44	1 台出力为 150 MW 的常规机组因故障而停运。
18:28	向上平衡电量容量裕度下降至低于阈值; 向上调节辅助服务用完; ERCOT 调用非旋转辅助备用服务, 并通知可快速启动的燃气机组开机。
18:33	系统频率下降, 其值低于 59.91 Hz; ERCOT 的 LFC 程序自动调用了 328 MW 的机组旋转备用容量。
18:41	旋转备用容量裕度下降至低于 1 750 MW 的阈值, ERCOT 宣布进入紧急电力消减计划第 2 级。
18:49	ERCOT 通知所有承担旋转备用服务的负荷用户断开负荷, 10 min 内共计 1 108 MW 的负荷被断开。
18:52	系统负荷恢复到 60.07 Hz。
20:08	ERCOT 宣布将紧急电力消减计划由第 2 级降至第 1 级。
21:40	ERCOT 宣布结束紧急电力消减计划。

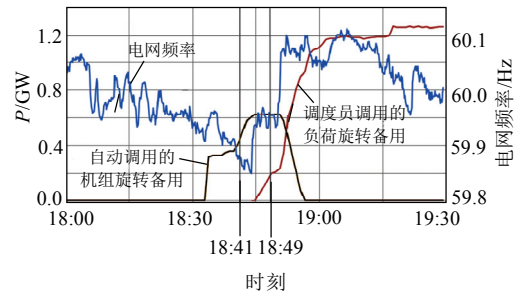


图 6 ERCOT 电网 2008 年 2 月 26 日事件中的电网频率变化、调用的机组旋转备用与负荷旋转备用  
Fig. 6 System frequency and deployed responsive reserve provided by generating units and load resources in ERCOT event on February 26, 2008

## 5 结论

1) ERCOT 通过多次 SCUC 计算, 反复校核调整开机方式, 保障了实时运行中可调用容量的充裕, 从而安全应对风电出力的随机波动和反调峰, 最大程度地消纳风电。国内有关网、省调度机构应高度重视日前对开机方式的优化安排以及运行中对备用容量的实时监控。

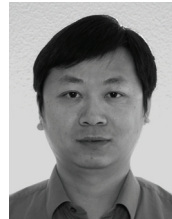
2) ERCOT 进行 SCUC 和 SCED 计算时, 都引入了最新的风电功率预测结果, 以充分考虑风电出力的影响, 实现对常规机组的调度调整。国内有关网、省调度机构也应将风电功率预测结果切实应用到对开机方式安排和实时调度调整的决策支持中。

3) ERCOT 电网中各风电场为实现风电功率预测提供了背景、运行和检修 3 类信息, 因涉及经济利益, 故信息的可信性和时效性都非常高, 从输入数据方面保证了风电功率预测的精度。国内有关网、省调度机构应重视风电场的基础数据和信息接

入工作, 切实督促其按要求上报合格数据, 同时对风电功率预测结果进行评估反馈, 不断提高预测水平, 为风电调度运行打造坚实的技术支持平台。

## 参考文献

- [1] 李俊峰, 施鹏飞, 高虎. 中国风电发展报告 2010[M]. 海口: 海南出版社, 2010: 14.
- [2] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.  
Zhang Liying, Ye Tinglu, Xin Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9(in Chinese).
- [3] 汤奕, 邵盛楠, 刘浩明, 等. 中国与美国和欧盟智能电网之比较研究[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 7-15.  
Tang Yi, Shao Shengnan, Liu Haoming, et al. Comparative study on smart grid related R&D in China, the United States and the European Union[J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 7-15(in English).
- [4] 孙华东, 王琦, 卜广全, 等. 中国智能输电系统发展现状分析及建议[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 1-6.  
Sun Huadong, Wang Qi, Bu Guangquan, et al. Analysis and suggestions on current development status of smart power transmission systems in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 1-6(in English).
- [5] 张运洲, 李晖. 中国特高压电网的发展战略论述[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 1-7.  
Zhang Yunzhou, Li Hui. Analysis on the development strategies of the UHV grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(22): 1-7(in English).
- [6] American Wind Energy Association. 2009 US wind industry annual market report: ranking[R]. Washington, DC: American Wind Energy Association, 2010.
- [7] The Electric Reliability Council of Texas. 2009 ERCOT annual report[R]. Austin, TX: The Electric Reliability Council of Texas, 2010.
- [8] Public Utility Commission of Texas. CREZ transmission program overview[EB/OL]. 2010-12-15. <http://www.texascrezprojects.com/overview.aspx>.
- [9] The Electric Reliability Council of Texas. 2010 electric system constraints and needs[R]. Austin, TX, USA: The Electric Reliability Council of Texas, 2010.
- [10] The Electric Reliability Council of Texas. ERCOT nodal protocols [S]. Austin, TX: The Electric Reliability Council of Texas, 2010.
- [11] Zack J. Overview of the current status and future prospects of wind power production forecasting for the ERCOT system[R]. Albany, NY: AWS True Power, LLC, 2009.
- [12] 谷兴凯, 范高锋, 王晓蓉, 等. 风电功率预测技术综述[J]. 电网技术, 2007, 31(S2): 335-338.  
Gu Xingkai, Fan Gaofeng, Wang Xiaorong, et al. Summarization of wind power prediction technology[J]. Power System Technology, 2007, 31(S2): 335-338.
- [13] The Electric Reliability Council of Texas. ERCOT nodal real time operating procedure[R]. Austin, TX: The Electric Reliability Council of Texas, 2010.
- [14] Ela E, Kirby B. ERCOT event on February 26, 2008: lessons learned[R]. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2008.
- [15] The Electric Reliability Council of Texas. ERCOT operations report on the EECF event of February 26, 2008[R]. Austin, TX: The Electric Reliability Council of Texas, 2008.



罗旭

收稿日期: 2011-03-08。

作者简介:

罗旭(1976), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电网调度运行、能量管理系统、电力市场管理系统、智能电网等, E-mail: xu.luo@ieee.org;

马珂(1978), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电网调度运行、水电及新能源发电调度运行, E-mail: ma-ke@sgcc.com.cn。

(责任编辑 杜宁)