风力发电对电网旋转备用的影响及对策

风力发电具有随机性、波动性和间歇性，并具有反调峰特性，风电功率短期预测准确度不高。大规模风电并网增加了系统的不确定性，给调度运行工作带来了很多挑战，电网中预留充足的旋转备用容量显得格外重要。通过实例介绍了风电出力特性，并在此基础上分析风电并网对电网旋转备用设置的需求，最后结合生产实际，对如何提高风电消纳水平提出了一些建议，供电网调度部门参考。

李有亮　麦　立　王　磊/安徽电力调度控制中心

李有亮/工程师

关键词/Keywords

风电·

不确定性·

电网调度·

旋转备用·

0　引言

近年来，我国风力发电发展迅速，以华东为例，截至2015年11月，华东电网风电装机容量达853万kW，新增容量为236万kW，同比增长38.19%。风电具有随机性、波动性和间歇性，并具有反调峰特性，当电网调度资源无法平衡风电出力的随机波动时，可能出现弃风现象[1]。日前调度计划安排中调度部门需留有充足的旋转备用以应对风电的不确定性。如何既保证电网安全经济，又能提高风电消纳水平，是电网调度运行部门当前面临的一大难题[2-4]。

本文首先介绍了风电的出力特性，在此基础上分析大规模风电并网对调度部门旋转备用容量设置的影响，最后针对如何提高风电消纳水平提出了一些建议，供调度部门参考。

1　风电出力特性分析

1.1　风电的不确定性

风能是一种间歇性能源，尤其是风速具有很强的波动性和随机性，风力发电难以进行人工控制，因而风电场出力具有随机性、波动性和间歇性等特点。对于省级及以上电网来说，区域内一般有多个风电场，各风电场所在地的气候不尽相同，其出力可能具有一定的互补特性，风电出力的的波动性会随着风电规模的增大而趋于缓和[5]。

以实例来说明，图1为30 min内某省风电总出力曲线。由此可见，即使是全省多个风电场的出力累加，其短时波动性还是不可避免，且规律性较差。图2为相邻两天某省风电总出力对比。与图1对比可见，风电的波动性随时间尺度的增大而上升，风电出力整体呈现昼低夜高的特点，曲线具有一定的相似性，但即便是相邻两天，部分时段的差异还是比较大，如凌晨01：00前后两天的风电出力相差一倍以上。图3为半年内全省风电日发电量曲线，由此可见风电具有较强的随机性。

图1　风电总出力曲线（30 min）

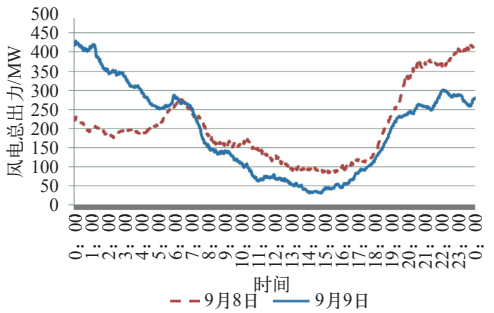

图2　风电总出力曲线（相邻两天）

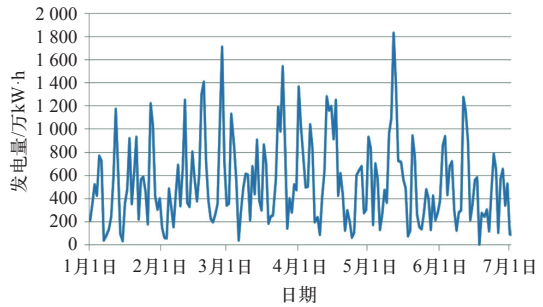

图3 风电日发电量（半年）

1.2 风电预测准确度不高

风电功率的长期、中期、短期和超短期预测分别向系统规划、月度检修计划、日前计划和实时运行提供信息[6]。短期风电功率预测可以供调度部门优化机组起停、受电计划等。风电出力预测可以分为基于风速的预测方法和基于风电功率的预测方法两种。

某海上风电场出力与风速的关系如图4所示，由此可见风电功率与风速密切相关，并呈现非线性关系。因而即便能够得到准确的风速数据，受风电场地形地貌等因素影响，也无法避免风速与风电功率转换时存在的误差[7]。

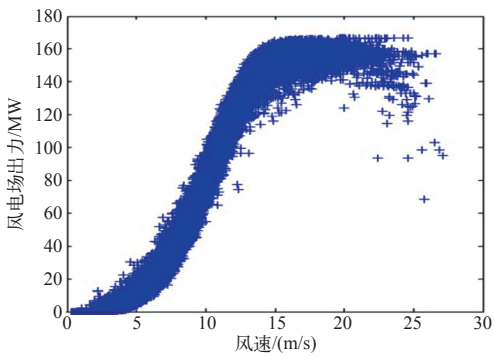

图4 风电出力与风速的关系

风电功率预测方法主要有时间序列法[8]、神经网络法[9]和支持向量机法[10]等，以及在此基础上的改进和组合方法。目前，基于数值天气预报（NWP）的风电功率预测技术由于不需要大量历史数据的积累，越来越受到人们关注，该方法根据数值天气预报得到的风速、风向、温度、湿度和气压等数据，结合风电场的地理信息建立物理模型，计算得到风电场出力，预测准确度主要取决于数值天气预报的准确性[11]。

目前来看，风电功率的可预测性较差，日前风电功率的预测准确度约为85%[12]，很难达到负荷预测的准确度（通常可以达到95%以上），预测误差也会随着预测周期的增长而变大，特别是最大误差难以掌控[13]。加强运行数据的积累，提高NWP的更新频率，采用多种方法进行组合预测，利用数据挖掘技术分析数据内在规律，对于提高风电功率短期预测误差有重要意义。但理论上来说，无论采用何种预测方法，都不能突破由预测对象本身所决定的预测准确度极限。

1.3 风电的反调峰特性

如果风电出力的变化趋势与电网负荷的变化相同或相近，则风电具有正调峰特性；如果相反，则风电具有反调峰特性。风电的随机性导致其既可能增加电网峰谷差，也可能减少峰谷差。统计表明，2010年国家电网的风电运行反调峰比例为43%，华北地区高达59%。

以某省为例，风电出力的反调峰特性如图5所示，在白天负荷高峰时段风电出力较小，部分风电场可能零出力；而在夜间负荷低谷时段，风力充足，风电场甚至可能满发。风电的反调峰特性增加了电网的负荷峰谷差，如果风电装机容量占系统总装机容量比例较高，而系统中可以快速调节的灵活电源又较少，极易造成电网调峰困难。

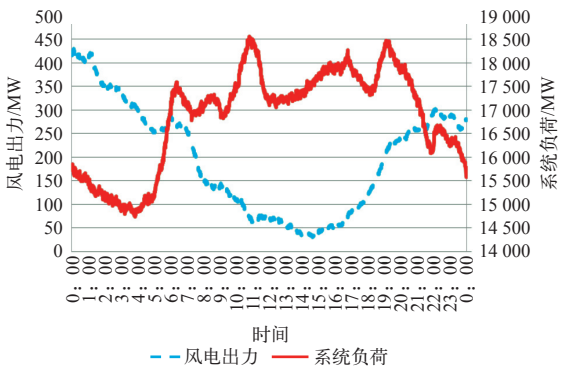

图5 风电出力的反调峰特性

2 风电并网对备用容量设置的影响

在传统的电力系统经济调度中，一般在满足

系统有功平衡约束、火电机组出力约束、爬坡约束、潮流约束和备用约束等基础上，通过优化调整火电机组出力，实现总发电成本最小。在实际的调度计划安排中，还要考虑到机组检修计划、年度计划完成率等因素。如果电网中没有风电或者并网风电容量较小，调度部门在预留旋转备用容量时一般不考虑风电影响，此时的备用容量可以设置为系统负荷的一定比例（如3%～5%），或者考虑系统中最大单机容量，以应对负荷预测误差、机组故障等情况。对于含大规模风电的电网，系统中必须留有足够的旋转备用以应对风电出力的随机性。特别是在天气变化较大的季节，负荷预测本身可能出现较大的误差，如果风电出力预测误差也较大，叠加效应可能导致电网供电能力不足或负备用容量不足。

目前，考虑风电随机性的日前调度研究基本上可以分为确定性建模和不确定性建模两种方法。确定性建模一般是额外增加旋转备用以应对风电的随机性，如按风电功率预测值的某个比例额外增加一些备用容量[14]，但比例的选取较难确定，备用容量的设置很难恰到好处。不确定性建模包括随机规划[15]、模糊规划[16]和鲁棒优化[17]等方法。随机规划依赖于描述风电不确定性的概率分布，一般认为风电功率或者风电功率预测误差为随机变量，模型求解得到的决策结果是使约束条件成立的概率不小于某一置信水平，而不是100%满足，对调度运行人员而言，置信水平的确定缺乏标准。模糊规划的关键在于确定模糊变量的隶属函数，目前还是缺乏有效的方法，模型求解最终得到某个满意度水平下的决策，但满意度水平难以具体体现在电网生产实际中。鲁棒优化需要对系统中的不确定性量进行预先判断，基于现有可用数据生成未来可能出现的所有场景，并选出场景集作为调度决策的依据，决策者对场景集的选择缺乏依据。

目前，由于仍缺乏快速有效的方法应对风电的不确定性，调度部门大多采用的是相对粗放、传统的发电计划编制方法，备用设置要么偏乐观要么偏保守。理论上来说，只有预留100%风电容量水平的旋转备用，才能确保全额消纳风电，但对整个系统而言，不够安全和经济。

目前，我国的电力供应仍是以火电为主，电网中备用容量的大小与火电机组开机方式密切相关。如果电网中火电开机方式偏小，在风电、光伏等新能源发电出力严重低于计划值时，系统没有足够的正备用，可能导致电网供电能力不足，无法满足用户需求。如果电网中火电开机方式过大，正备用过多，机组出力普遍较低，将影响到电厂生产效率，同时还会影响电厂脱硫、脱销设备的投运率，进而涉及到环保问题。开机方式过大还可能导致负备用不足，在夜间负荷低谷时段，风电出力往往较大，特别是在汛期，系统中的水电开机方式也较大，风电、水电同时大发，导致常规火电机组出力被压低到技术最低出力，此时要做到风电全额消纳，只能安排机组紧急停机。紧急停机不但增加了运行成本，还可能导致白天电网高峰负荷时段供电能力不足，在日常调度运行中一般较少采用。

3 对策分析

除了在日前计划安排中预留足够的旋转备用以外，电网调度部门还可以通过以下几方面提高风电消纳水平，减轻风电不确定性对电网调度运行的影响。

3.1 优化抽水蓄能机组的运行方式

为减轻风电反调峰特性的影响，调度部门在日前计划安排中，可先根据风电功率预测和光伏发电预测结果合理安排抽水蓄能机组运行方式，达到风－光－水互补运行，然后再开展考虑安全约束的经济调度安排火电机组发电计划。

以某省2015年9月9日实际运行为例，当日风电和光伏发电曲线如图6所示，风电在凌晨达到最大出力，下午14：00左右达到最低值，反调峰特性明显；光伏发电夜间出力为0，在12：00左右达到最大值，呈现正调峰特性。风电与光伏发电具有一定的互补特性。调度安排抽水蓄能机组在风电出力较高同时也是系统负荷较低的凌晨开机抽

水，在风电低谷时段开机发电，达到风－光－水互补运行，减轻风电的影响，如图7所示。由此可见，系统中如果有足够的抽水蓄能机组，可大大减轻风电反调峰特性对电网的影响，提高电网在负荷低谷时段的风电接纳能力。

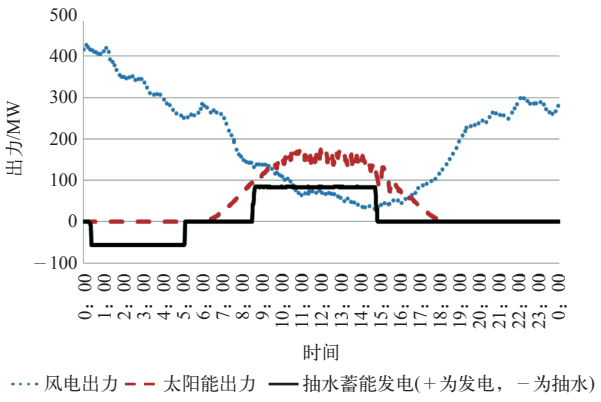

图6　风、光、抽水蓄能发电曲线

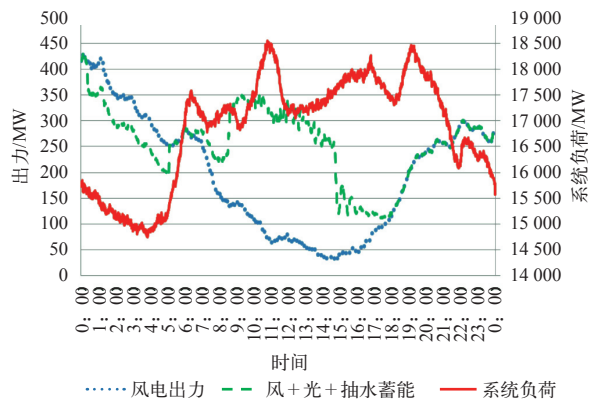

图7　抽水蓄能电站的作用

3.2　加强火电机组调节能力管理

我国发电装机中仍然是以煤电为主，出力调节速度偏慢，系统中缺乏可以快速调节的灵活电源。随着新能源的不断发展和人们对生存环境的更高要求，火电机组参与调峰是发展趋势。调度部门加强对火电机组特别是供热机组的运行管理和指导，积极开展火电机组一次调频性能试验和AGC响应性能试验，充分挖掘机组的深度调峰能力，探索自备电厂参与电网调峰的模式，研究火电机组调峰补偿机制和辅助服务市场模式，对提高风电、光伏等新能源的消纳能力以及电网安全稳定水平都有着重要意义。

3.3　加强新能源发电预测研究

风电场功率预测一般是根据风电场的历史风速、历史功率、地形、数值天气预报和机组状态等数据建立预测模型，得到风电场未来的输出功率。风电场历史运行数据的有效性和数值气象预报的准确度，在一定程度上决定了风电功率预测的准确性。而风电功率的准确性影响到电网旋转备用的设置，进而影响整个电网的经济性和安全性。随着电力市场改革的推进，风电场在未来会实现竞价上网，风电功率预测水平也会影响风电企业的报价。风电场加强运行管理以及与气象部门的沟通，确保运行数据积累的完整性和准确性，电网调度部门做好各风电场历史运行数据的收集工作，组织各风电场之间实现运行数据共享，共同提高风电功率预测水平。

3.4　建立新能源跨区市场交易平台

我国的风电资源主要集中在东北、华北和西北地区，光伏发电主要在西北地区，水力发电主要在西南地区，但用电负荷主要集中在东南部沿海地区。我国幅员辽阔，不同地区间的气候特性差别很大，因而能源特性也不尽相同，不同区域间的负荷和发电出力都可能有一定的互补特性。调度部门加强主网运行协同，各区域电网间充分利用跨区特高压直流线路的输送能力，区域内部各省网间充分利用省际联络线的输送能力，研究建立新能源跨区跨省现货交易市场，实现电网间备用共享，促进新能源跨区消纳，提高消纳水平。

3.5　积极推进电力需求侧管理

需求侧管理可以通过政策等手段来调节用电负荷，实现负荷的削峰填谷。目前，国内的峰谷电价差异并不是很大，对用户自觉削峰填谷的激励有限。随着电力市场改革的推进，售电侧市场逐步放开，电网公司会越来越重视投资效益，相比较单纯地投资新建输变电设备来说，通过需求侧管理发挥电价的激励能力，引导用户进行能效管理，则更加科学合理。此外，我国电动汽车产业发展迅速，根据工业和信息部预计，2030年全国电动汽车充电功率最多将占全国装机容量

的25%，电动汽车既是用电负荷又具备向电网提供电能的能力。电网公司应加强对用电侧数据的积累和分析，挖掘电动汽车、分布式电源的削峰填谷作用。调度部门在预估电网负备用可能不足时，联合营销部门通过灵活电价对用户进行引导，在风电大发时期提高用电负荷，进而提高风电消纳水平。

4 结束语

风电是一种可再生的清洁能源，发展风电对解决能源危机、减轻大气污染以及调整能源结构有重要意义。但风电具有不确定性和反调峰特性，预测准确度不高，给电网调度运行带来挑战。建立火电机组调峰补偿机制，提前规划建设抽水蓄能电站、燃机等灵活电源，深入开展风电功率预测研究，建立新能源跨区现货交易市场，加强主网运行协同和全网备用共享，积极推进电力需求侧管理，这些措施对于提高风电等间歇性能源的消纳水平有重要意义，需要电网公司与发电集团、政府部门等共同努力。

参考文献

[1] 张新松，郭晓丽，周辉，等．基于多目标优化的日前风电接纳研究 [J]．南方电网技术，2016，10 (1)：60-67．

[2] 任博强，彭鸣鸿，蒋传文，等．计及风电成本的电力系统短期经济调度建模 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (14)：67-72．

[3] Dany G．Power reserve in interconnected systems with high wind power production [C]．2011 IEEE Porto. Power Tech. Proceedings，2011，4．

[4] 张新松，礼晓飞，王运，等．不确定性环境下考虑弃风的电力系统日前调度 [J]．电力系统保护与控制，2015 (24)：75-82．

[5] 崔杨，穆钢，刘玉，等．风电功率波动的时空分布特性 [J]．电网技术，2011 (2)：110-114．

[6] 薛禹胜，雷兴，薛峰，等．关于风电不确定性对电力系统影响的评述 [J]．中国电机工程学报，2014 (29)：5029-5040．

[7] 王勃，冯双磊，刘纯．考虑预报风速与功率曲线因素的风电功率预测不确定性估计 [J]．电网技术，2014，38 (2)：463-468．

[8] Rajagopalan S，Santoso S．Wind power forecasting and error analysis using the autoregressive moving average modeling [C]．IEEE Power & Energy Society General Meeting，July 26-30，2009，Austin，USA．

[9] Kariniotakis G N，Stavrakakis G S，Nogaret E F．Wind power forecasting using advanced neural networks models [J]．IEEE Transactions on Energy Conversion，1996，11 (4)：762-767．

[10] Mohanded M A，Halawani T O，Rehman S，et al．Support vector machines for wind speed prediction [J]．Renewable Energy，2004，29 (6)：939-947．

[11] 王丽婕，冬雷，高爽．基于多位置NWP与主成分分析的风电功率短期预测 [J]．电工技术学报，2015，30 (5)：79-84．

[12] 丁恰，李利利，汪洋，等．适应大规模风电接入的发电计划不确定性处理方法分析 [J]．中国电力，2015，48 (3)：127-132．

[13] 杨秀媛，肖洋，陈树勇．风电场风速和发电功率预测研究 [J]．中国电机工程学报，2005，25 (11)：1-5．

[14] 周玮，彭昱，孙辉，等．含风电场的电力系统动态经济调度 [J]．中国电机工程学报，2009，39 (25)：13-18．

[15] 郭小璇，龚仁喜，鲍海波，等．含新能源电力系统机会约束经济调度的二阶锥规划方法 [J]．电力系统保护与控制，2015，43 (22)：85-91．

[16] 艾欣，刘晓，孙翠英．含风电场电力系统机组组合的模糊机会约束决策模型 [J]．电网技术，2011，35 (12)：202-207．

[17] 黎静华，文劲宇，潘毅，等．面向新能源并网的电力系统鲁棒调度模式 [J]．电力系统保护与控制，2015，43 (22)：47-54．

[18] 张顺，葛智平，郭涛，等．大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究 [J]．电力系统保护与控制，2016，44 (1)：48-51．

（收稿日期：2016－12－13）EA