

风电消纳关键问题及应对措施分析

朱凌志，陈 宁，韩华玲

(国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司，江苏省南京市 210003)

摘要：针对大规模风电接入电网给电网安全运行带来的新问题和新的挑战，在分析中国风电发展特点的基础上，结合欧美等国家的经验，从系统调节能力、电网输电能力、风电技术性能、风电调度运行水平等角度论述了影响风电消纳的关键因素。并根据中国特点，从加强调峰电源和跨区电网建设、突破风电并网运行关键技术、建立完善风电发展的配套政策措施等角度，提出了促进中国风电消纳的应对措施。

关键词：风力发电；并网；消纳；电源建设；调度运行；政策措施

0 引言

风能资源是清洁的可再生能源，风力发电是目前新能源发电中技术最成熟、最具规模化开发条件和商业化发展前景的发电方式之一。积极开发利用风电，对增加中国能源供应、调整能源结构、减少环境污染、应对气候变化、实现可持续发展等具有重要意义。中国风能资源丰富，陆上和近海区域 50 m 高度可开发利用的风能储量约为 2 580 GW，风电发展具有良好的资源条件。“十一五”规划以来，中国风电发展迅速，装机容量连续 5 年实现翻番^[1-3]，截至 2010 年底，中国已并网运行的风电装机容量达到 29.56 GW。

随着风电在电源结构中的比例不断增大，其对电力系统安全稳定运行的影响日益显著。部分地区风电发展与系统安全运行的矛盾逐步显现，弃风现象不断出现，风电消纳已经成为影响中国风电健康发展的关键问题。本文在总结中国风电发展基本特点的基础上，分析了影响风电消纳的关键因素，并结合国外相关国家的成功经验，提出了促进风电有效消纳的措施和建议。

1 中国风电发展的特点

1.1 风电开发集中度不断提高

中国风资源主要分布在东北、华北、西北等“三北”地区以及江苏省、山东省等东南沿海地区。与欧洲风电多为分散式、小容量开发、接入中低电压等级、就地消纳的特点不同，大规模集中开发、中高压

接入、远距离输送是中国风电的主要开发模式。

据统计，2010 年底，中国装机容量达到或超过 100 MW 的并网风电场数量达到 127 座，其装机容量之和达到风电总装机容量的 64%。

此外，中国风电开发的地域差别较为明显。由于风能资源分布的不均，2010 年底，东北、西北和华北等“三北”地区的风电并网容量占全国风电总容量的 91%。排名前 10 位的省区风电并网容量合计 25.364 GW，约占风电并网总容量的 90%。蒙西、蒙东、辽宁、吉林、黑龙江等省区的风电并网容量占其统调总装机容量的比例均超过了 10%。

1.2 风电利用水平不断提高

中国风电装机容量和发电量总体占比相对较低，但某些风能资源丰富地区的风电装机容量比例、发电量和运用水平已与风电发达国家相当。如，中国蒙东、蒙西、吉林、黑龙江等区域风电装机容量占比、发电量占比、风电出力占负荷的比例等指标都达到了较高水平，与风电发达的丹麦、西班牙和德国基本相当。

2010 年，全国风电机组平均利用小时数达到 2 097 h，其中冀北、蒙东、蒙西和黑龙江风电利用小时数分别达到 2 295 h，2 218 h，2 118 h 和 2 031 h。中国风电整体利用水平不断提高。中国部分地区风电利用水平如表 1 所示。

表 1 中国部分地区风电利用水平(2010 年)
Tab. 1 Wind power penetration in some regions in China in 2010

地区	风电装机容量占最大负荷比例/%	风电电量占当地总用电量比例/%
蒙东	82.0	21.1
蒙西	35.0	8.7
吉林	28.6	5.6
黑龙江	21.5	4.6

收稿日期：2011-10-14。
国家电网公司重大科技项目“包含风电出力预测系统的风电场一体化监控技术研究”；国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A104)。

1.3 风电技术和管理水平相对落后

与快速增长的风电建设规模相比,中国风电的技术和管理水平,尤其是并网技术和管理水平相对落后,不利于中国风电的健康可持续发展。

1) 风电机组技术水平相对落后。虽然中国已有 60 多家企业从事风电设备的整机生产,已具备很强的机组生产能力,但风电机组的设计能力以及主轴、变流器等关键部件的国内制造能力相对薄弱。同时,设备制造企业在风电并网技术方面的投入不够,很多机组不具备有功和无功调节能力,绝大多数机组不具备故障穿越能力,且耐受异常工况的能力较差,无法为电网提供支撑^[4-5]。

2) 风电场的技术和管理水平相对落后。风电场的自动化、信息化水平较低,不同厂商的风电场监控系统无法相互兼容;很多风电场不具备无功自动控制系统,无功调节只能通过额外安装无功补偿设备实现,无法充分利用风电机组自身的无功调节能力。绝大多数风电场不具备功率预报预测功能,不能按照要求向电网企业上报发电计划,也无法根据发电计划自动调节风电场的功率输出。

1.4 促进风电发展的配套机制尚不完善

包括可再生能源发电全额保障性收购政策的配套实施细则没有出台,风电送出工程的激励政策有待加强,对于大型风电基地的远距离送出工程,现有政策尚未制定合理的电价机制,投资回收困难。此外,对其他电源为风电消纳提供的调峰、调频、调压等辅助服务没有建立定价和补偿机制。

2 影响风电消纳的主要因素

风电消纳是当前风电快速发展过程中需要解决的主要问题,影响风电消纳的因素可归为 2 个方面。一是消纳能力方面,决定一个地区风电消纳能力的主要因素包括系统调节能力、电网输电能力等;二是消纳水平方面,主要包括风电并网技术性能、风电调度运行水平等,这些因素决定了在现有客观条件下,能否实现风电的最大化消纳。

2.1 系统调节能力

风能具有间歇性、波动性、随机性的特点。此外,从风电的年出力特性看,中国大部分地区的风电出力呈现春季、冬季较大,夏季、秋季较小的特点;而从日出力特性看,中国风电出力多数是在白天负荷高峰时段较小,后半夜负荷低谷时段较大,呈现明显的反调峰特性。风电的大规模接入给电力系统的调频调峰带来了严峻的挑战。

因此,良好的电源结构和充足的备用容量是风电消纳的基础,风电开发客观上需要一定规模的灵

活调节电源与之相匹配。欧美等国家在大力发展风电的同时,注重配套抽水蓄能、燃油燃气等灵活调节电源的建设。如图 1 所示,美国、西班牙、德国灵活调节电源的比例分别达到了 48.4%,36.4% 以及 22.8%。充足的调节能力是这些国家风电开发和消纳的有力保障。

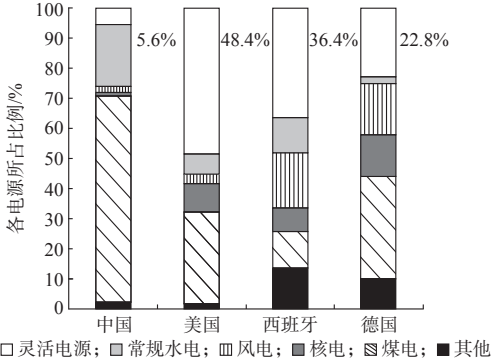


图 1 4 国电源结构对比 (2009 年底)
Fig. 1 Comparison on generation composition of the four countries at the end of 2009

以西班牙为例,其电源装机容量以火电和水电为主,核电也占相当比重。为了适应风电装机规模和发电量不断提高的需要,西班牙近年来大力发展具有深度调峰能力的燃气机组、油气混合燃料机组,积极推动抽水蓄能机组建设。截至 2010 年底,西班牙电力总装机容量为 97.45 GW,是最大负荷的 2.2 倍,系统备用率很高。其中,水电(含抽水蓄能)装机容量为 16.66 GW,占 17.1%;核电装机容量为 7.72 GW,占 7.9%;煤电装机容量为 11.38 GW,占 11.7%;燃油燃气装机容量为 28.08 GW,占 28.8%;风电装机容量为 19.81 GW,占 20.3%;其他电源 13.8 GW,占 14.2%。其中,燃油、燃气机组及水电(含抽水蓄能)等灵活调节电源所占比例为 45.9%,约为风电的 2.3 倍,是西班牙风电有效消纳的重要技术保障。2010 年西班牙风电发电量为 42.7 TW·h,风电发电量占总用电量的 16%,风电消纳达到了很高的水平。

2010 年 11 月 9 日 03:35,西班牙主网风电出力占负荷比例的瞬时值达到 54%,当日风电发电量达到 317 GW·h,占总发电量的 43%。当时系统负荷为 23.08 GW,风电出力为 12.342 GW,其他新能源(含太阳能、地热、生物质能等)装机容量为 13.8 GW,出力 4.091 GW。为满足风电等新能源消纳的需要,其他常规电源最大限度停运或降出力运行,灵活电源发挥了尤其重要的作用。其中水电(含抽水蓄能)出力为 2.02 GW(抽水蓄能工作在抽水位置);燃油/燃气双燃料电源出力为 0,处于停

机备用状态;燃气联合循环机组出力降至 1.435 GW;煤电出力降至 0.684 GW;核电出力为 7.387 GW;同时向境外送电 0.837 GW,满足了风电等新能源消纳的需要。具体的系统有功功率平衡表如表 2 所示。

表 2 系统有功功率平衡表
Tab. 2 Active power balance table

电源形式	出力/GW	备注
供电负荷	23.082	总装机容量 97.45 GW, 当日最大负荷 36.274 GW
系统运行出力	23.082	
跨国交换	-0.837	
水电(含抽水蓄能)	-2.020	常规水电装机容量 11.33 GW, 抽水蓄能装机容量 5.32 GW
核电	7.387	总装机容量 7.71 GW
煤电	0.684	总装机容量 11.38 GW
燃油(燃气)	0	总装机容量 2.86 GW
联合循环	1.435	总装机容量 25.22 GW
风电	12.342	总装机容量 19.81 GW
其他新能源	4.091	总装机容量 13.8 GW

与欧美等国家相比,中国具备灵活调节能力的电源比例明显不足。截至 2010 年年底,中国发电总装机容量为 976.89 GW,其中,火电总装机容量为 693.98 GW,占比达到 71%,水电和油电占比则分别为 21%和 2.7%,但由于地域分布不均,对风电调节能力有限。风资源丰富的东北、华北、西北地区,电源结构则以火电为主,东北地区煤电比重超过 80%,华北地区煤电比重超过 90%。随着风电开发规模逐渐增大,特别在冬季,火电机组的供热期、水电机组的枯水期、风电机组的大发期相互叠加,导致调峰困难,风电消纳受到制约。调峰能力不足已成为制约中国风电消纳的主要因素之一。

以吉林省电网为例,电源结构以火电(煤电)为主,2010 年火电装机容量为 13.363 GW,其中供热机组为 9.522 GW,占火电装机容量的 71%以上;风电装机容量为 2.209 GW,水电装机容量为 141.7 MW,而吉林省 2010 年最大用电负荷仅为 7.73 GW。在冬季供热期间,即使不考虑风电系统有限的调峰能力,风电的大规模接入会进一步加剧调峰的难度,为保证供热,也不得不限制风电出力。截至目前,吉林省电网并网风电场共限出力已超过 150 次,最大限出力约为 500 MW,2010 年弃风电量约占风电总发电量的 5.7%。

2.2 电网输电能力

风电的随机性和间歇性特点使得大规模风电并网后,系统对备用容量的需求大幅增加。通过提高电网输电能力,可以扩大风电平衡区域范围,充分利用系统备用容量,并可根据不同地区负荷峰谷的时

间差消除风电出力波动性对系统的影响,提高风电并网消纳规模。

西班牙风能资源主要集中在北部和南部的沿海区域,风电场也是以成片开发的大规模电场为主,但其电力负荷区域主要集中在中部的马德里和东部的巴塞罗那地区,大量风电需要跨地区输送。近年来,西班牙在电网建设方面主要以 400 kV 骨干网架为主。2005—2009 年,新增 400 kV 输电线路 1 180 km,占新增线路的 69.6%。同时,西班牙电网与法国、葡萄牙等周边国家的电网连接。欧洲大陆电网为西班牙的风电消纳提供了巨大市场,并起到了“蓄水池”的作用,进一步增强了西班牙应对风电出力波动的能力。

按照规划,至 2016 年,西班牙风电装机容量将达到 30 GW。为此,西班牙计划继续加大高电压等级输电网的建设力度,2009—2013 年,5 年内投资 40 亿欧元用于电网建设,并发布了 2016 年电网规划方案(见附录 A 图 A1)。在西北部的加利西亚(Galicia)至阿斯图里亚斯(Asturias),新建约 500 km 的 400 kV 线路;南部的穆尔西亚(Murcia)至安达鲁西亚(Andalucia),新建约 650 km 的 400 kV 线路;中部的曼萨纳雷斯(Manzanares)至布拉萨特塔斯(Brazatortas),新建约 500 km 的 400 kV 输电线路。

在加强国内电网建设的同时,西班牙还计划进一步加强与法国、葡萄牙等周边国家的联网建设。2008 年,REE 与法国电网公司(RTE)签署了合作协议,计划在 2012 年前新建一条西班牙与法国互联的 400 kV 同塔双回输电线路,最大输送功率为 2.16 GW,以加强与欧洲大陆电网的联系,实现更大规模的风电送出和消纳。

美国是世界上风电装机总量最大的国家。近年来,风电呈现迅猛发展势头,对电力系统运行的影响日趋显著。针对这一情况,美国能源部委托国家可再生能源实验室(NREL)围绕风电发展对电网的影响、成本及效益等问题开展了研究。2010 年 1 月,NREL 发布了关于美国东部互联电网风电并网的最新研究报告^[6],详细分析了东部互联电网到 2024 年实现风电电量穿透率 20%目标下的成本及效益。

报告指出,要达到预想的风电发展目标,必须加大高压输电线路建设投资,提高美国州际间的电力输送能力。美国东部互联电力系统中,陆上风电资源大多集中在中西部大平原地区,而负荷中心则位于东部大西洋沿岸地区。要实现风电电量穿透率 20%~30%的预想目标,需要在风资源区和负荷区进行大容量、远距离的电力输送。综合考虑技术和

经济条件,建设 765 kV 交流线路和 800 kV 直流线路,是在东部互联系统中输送风电的较好选择。

报告还指出,要提高风电并网消纳规模,必须扩大平衡区域范围。目前,在美国东部互联系统中有大小 84 个平衡区域,这些区域发电量和用电量基本在区域内自我平衡,与外部交换电力较少。报告认为,现有的这种分区平衡方式难以满足大规模风电并网消纳要求,必须进行平衡区域的合并,同时调整和改进电网调度运行方式。报告建议,到 2024 年将现有的小平衡区域合并为 7 个大平衡区域。2007 年 8 月美国东部电力系统平衡区域和 2024 年美国东部电力系统假想平衡区域如附录 A 图 A2 所示。

中国风电富集的东北、华北、西北等地区,大部分省区系统规模较小,负荷水平较低,网架结构相对薄弱,限制了风电消纳范围。东北电网虽然区域内联系较强,但黑龙江、吉林、辽宁以及蒙东地区均为风能资源丰富地区,风电装机规模较高、电源结构相近、调峰能力不足、区域内相互调剂能力有限,需要进一步扩大消纳范围;处于华北的蒙西电网与相邻的京津唐电网之间仅有 4 GW 的电力交换能力,且河北北部也是国家规划的千万千瓦级风电基地,在现有通道上加大蒙西电网的风电送出规模会挤占河北风电的消纳空间;西北的甘肃酒泉、新疆哈密是规划的千万千瓦级风电基地,但由于本地负荷小,距离负荷中心较远,即使利用已建成的 750 kV 输电通道,仍然不能满足千万千瓦级风电基地电力电量消纳的需求。在电源结构、系统调峰能力短期内难以解决的情况下,跨省跨区的电网输电能力,已成为中国风电消纳的最主要制约因素。

2.3 风电并网技术性能

能否保证风电大规模接入后不降低系统的安全稳定水平,是影响风电有效消纳的重要因素。为保证系统安全稳定运行,丹麦、德国、爱尔兰、英国等国家在 2002 年左右就已建立了完备的风电并网标准体系,对风电并网运行提出了详细的技术要求,如有功和无功运行范围、控制能力、低电压穿越能力、信息监控等。德国最新的并网标准更是提出了零电压穿越的要求,要求风电场、光伏电站在电网电压跌落到 0 的时候,仍能并网运行 150 ms(如附录 A 图 A3 所示)^[7]。在并网标准约束下,制造企业不断提高风电设备并网运行的技术水平,减少大规模风电对电网的冲击。

中国风电发展起步相对较晚,也没有强制性的风电并网技术标准。大部分设备制造企业依靠引进国外设计图纸生产组装风电机组,自主研发能力不足,已并网的风电机组大部分不具备有功、无功调节

功能和低电压穿越能力,风电场自动化水平较低,给电力系统的安全稳定带来了隐患。

甘肃千万千瓦级风电基地一期 5 GW 风电场建成以来,由于不具备低电压穿越能力,多次发生风电大发期间风电场局部故障导致大规模风电机组脱网事故,给电力系统的安全稳定运行带来了严重影响。2011 年 2—4 月期间发生的 3 次典型风电机组大规模脱网事故,如表 3 所示。为防止类似事故的发生,在风电场完成低电压穿越技术改造之前,不得限制风电的出力,风电的消纳受到制约。类似事故在吉林、华北等地也多次发生,影响了风电的健康发展。

表 3 2011 年 2—4 月酒泉风电典型脱网事故
Tab. 3 Typical trip-off faults at Jiuquan wind power base from February to April in 2011

时间	事故起因	事故后果
2 月 24 日 00:34	桥西第 1 风电场 35 kV 电缆头单相击穿	16 座风电场 598 台机组脱网, 损失出力 840 MW,西北 电网频率最低至 49.854 Hz
4 月 3 日 09:31	桥东第 2 风电场 35 kV 电缆头单相击穿	400 台机组脱网, 损失出力 568 MW
4 月 17 日 04:51	干西第 2 风电场 2 个 35 kV 电缆头绝缘击穿	16 座风电场 699 台机组脱网, 损失出力 1.006 GW,西北 电网频率最低至 49.815 Hz

2.4 风电调度运行水平

做好风电的调度管理,合理安排系统中其他电源的运行模式,是实现风电电量最大化消纳的关键。而建立完善的风电运行监测体系和风电功率预测预报机制,是实现风电优化调度的前提条件。

西班牙在 2006 年 6 月成立了世界上第 1 个可再生电力控制中心(CECRE)。CECRE 是西班牙国家电力调度控制中心(CECOEL)的下属运行部门,专门负责对可再生能源发电进行调度控制。西班牙法律要求风力发电公司必须成立实时控制中心,所有装机容量在 10 MW 以上的风电场的实时控制中心必须与 CECRE 直接互联。这些控制中心负责每 12 s 向 CECRE 上报有功功率、无功功率、电压、温度、风速等风电场运行数据,并根据 CECRE 的调度指令,调节风电出力,在 15 min 内达到相关要求。为了维持系统稳定,在某些特定情况下,有权切除部分风电或要求风电场降出力运行。如 2008 年 3 月 4 日由于低电压切负荷不得不同时切除 500 MW 风电,同年 11 月 2 日负荷很小从而不得不限制风电出力。同时西班牙电力法还规定,风电场必须对其发电量作出预测,并上报电网公司。当预测与实际所发电力相差超过 20%时,风电场要向电网公司缴纳罚款,相差越大罚款数目也越大。在相

关风电上网政策的推动下,西班牙在风资源短期预测、风机出力短期预测等领域开展了大量研究,加强历史数据积累,不断完善风电功率预测模型,预测精度明显提升。目前,西班牙已经能够将 48 h 内的预测误差控制在 30% 以内(平均误差不超过 20%)、24 h 内的预测误差控制在 15% 以内(平均误差不超过 10%),处于世界领先地位。短期风电功率预测技术已在西班牙风电场和电力系统调度中心得到广泛应用,为大规模风电并网提供了有力支撑。

从技术角度而言,目前中国的风电功率预测已取得了显著成绩。基于数值天气预报的数据,采用物理方法、统计方法和物理与统计相结合的风电功率预测技术研究已取得了阶段性成果。中国电力科学研究院、国网电力科学研究院均推出了商业化运行的风电预测预报产品,预测精度已经接近国外先进水平^[8-10]。

但从功率预测系统覆盖范围的角度而言,中国则与国外风电发达国家存在明显差距。一般地,电网调度部门和风电场端都应该安装满足精度要求的风电功率预测系统,中国风资源丰富的省级电网均安装了风电功率预测系统,可根据预测信息进行一定程度上的优化调度。但绝大多数风电场还没有配置风电功率预测系统,也不具备风电发电计划上报和执行功能,不利于系统的优化调度,也影响了风电的最大化消纳。

3 风电消纳的应对措施

3.1 加强跨区电网和调峰电源建设力度

系统调节能力和电网输电能力是影响风电消纳能力的最主要因素。为满足风电规模化发展需要,迫切需要加强调峰电源的建设。中国贫油少气,建设抽水蓄能电站是发展调峰电源的现实选择。东北、华北、西北等地区风电消纳能力不足,迫切需要加强跨区电网建设,扩大风电消纳范围,将“三北”地区风电输送至中东部负荷中心,充分发挥不同地区移峰错峰、水、火、风互济的效应,实现风电的有效消纳。

中国确立了“建设大基地、融入大电网”的风电发展思路,根据初步规划,中国 2020 年风电装机容量将达到 150 GW 以上,建成吉林、蒙东、蒙西、河北、甘肃、新疆、江苏、山东 8 个千万千瓦级风电基地。此外,辽宁、黑龙江、山西、宁夏等地区也将具备大规模发展风电的资源条件。除江苏、山东处于中东部负荷中心,风电消纳制约较小以外,其他地区均面临着风电电力无法在本省或本区域内消纳,需要跨省区外送的问题。此时需要从国家层面制定中国

风电的开发规划和统筹消纳方案,优化确定各个省区的风电开发规模和开发时序。同时,提前考虑配套电网送出工程和调峰电源的建设,做到风电与电力系统的协调发展。

3.2 大力突破风电并网调度运行关键技术

风电并网的运行调度技术水平是影响风电有效消纳的关键因素。为保证中国风电大规模接入电网后电力系统安全稳定运行,提高风电利用水平,应加强风电场功率预测、风电场监控、风电机组/风电场有功和无功控制、风电机组故障穿越等关键技术的研究和推广应用^[11-15]。

1) 风电场功率预测,应着重研究风电功率预测模型,建立高精度数值天气预报生产系统,结合短期、超短期等多个时间尺度的功率预测结果,提高风电功率预测精度。同时,加强风电场的功率预测系统建设,提高风电功率预测的覆盖率。建立风电发电计划的上报和执行等制度,做好风电的优化调度。

2) 风电场监控,根据相关标准和规范的要求,加强对风电场运行数据的全方位监测,督促风电场建立和完善其监控系统,开展与调度控制系统的互联接入技术研究,为电网调度部门调度和控制风电场提供支撑。

3) 风电机组/风电场有功控制,应着重开展风电机组有功功率在线调节技术研究,并结合风电功率预测信息开展风电场有功优化控制技术研究,从风电机组和风电场 2 个层面实现风电的有功控制。

4) 风电机组/风电场无功控制,应着重研究风电场对电网的无功支撑能力,在此基础上,充分利用风电场内的各种无功源,寻求合理有效的协调优化调控策略,实现风电场的无功优化控制。同时,从千万千瓦级风电基地角度研究电压无功补偿和控制的系统解决方案,增强风电基地的电压稳定性。

5) 风电机组故障穿越,应从提高风电机组和风电场抵御故障期间的低电压、高电压和频率异常的能力着手,通过改进控制手段或安装附加控制装置等方法,提升风电机组和风电场在故障期间支撑电力系统安全稳定运行的能力。

3.3 完善风电发展的政策措施

风电发展配套政策,包括技术方面的标准规范和经济层面的补偿机制,是目前制约中国风电最大化消纳的重要因素之一。

1) 建设并完善风电设备、并网、检测、调度管理等方面的标准规范体系,规范风电的设备制造、并网接入、调度运行,引导风电技术和管理水平的提升。

2) 建立风电配套输变电工程、跨区交易和调节的补偿机制,提高电网企业建设配套接入工程的积

极性,鼓励负荷中心消纳区外风电,并对常规电源以及为风电调峰提供合理的补偿。

3)制定合理的电价政策,在发电侧和用电侧均建立峰谷电价甚至分时电价,加强需求侧管理,一方面鼓励常规电厂在低谷时刻主动为风电腾出空间,另一方面也是调节用户的用电习惯,鼓励使用低谷电力,从而促进风电的消纳。

附录见本刊网络版(<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] EWEA. Wind energy statistics[R]. 2010.
- [2] Global Wind Energy Council. Global installed wind power capacity[EB/OL]. [2011-07-15]. <http://www.gwec.net>.
- [3] 裴哲义,董存,辛耀中. 中国风电调度运行管理现状、挑战及应对措施[EB/OL]. [2009-12-18]. http://dq.shejis.com/dqlw/200912/article_816_01_1.html.
- [4] 魏晓霞. 中国大规模风电接入电网面临的挑战[J]. 中国能源, 2010(2):19-21.
- [5] 黄怡,张义斌,孙强,等. 适应中国风电高速发展的举措建议[J]. 能源技术经济, 2010, 22(3):18-21.
- [6] 尹明,王成山,葛旭波. 风电并网经济技术评价研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(5):103-108.
YIN Ming, WANG Chengshan, GE Xubo. Review of economic technical assessment of wind power integration[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(5): 103-108.
- [7] BDEW. Technische richtlinie erzeugungsanlagen am mittelspannungsnetz[S]. 2008.
- [8] 高宗和,滕贤亮,张小白. 适应大规模风电接入的互联电网有功调度与控制方案[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17):37-42.
GAO Zonghe, TENG Xianliang, ZHANG Xiaobai. Solution of active power dispatch and control scheme for interconnected power grids with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 37-42.
- [9] ERNST B, OAKLEAF B, AHLSTROM M L, et al. Predicting the Wind[J]. IEEE Power & Energy, 2007, 5(6): 78-89.
- [10] SIDERATOS G, HATZIARGYRIOU N D. An advanced

statistical method for wind power forecasting[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 258-265.

- [11] 乔颖,鲁宗相,徐飞. 双馈风电场自动电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5):96-103.
QIAO Ying, LU Zongxiang, XU Fei. Coordinative strategy for automatic voltage control of wind farms with doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 96-103.
- [12] CHEN N, ZHU L Z, WANG W, et al. Partial Jacobian Matrix based method for assessing reactive power/voltage support ability of wind farm[C]// Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, November 24-27, 2008, Singapore.
- [13] 陈宁,朱凌志,王伟. 改善接入地区电压稳定性的风电场无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10):102-108.
CHEN Ning, ZHU Lingzhi, WANG Wei. Strategy for power control of wind farm for improving voltage stability in wind power integrated region[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 102-108.
- [14] 王松岩,朱凌志,陈宁,等. 基于分层原则的风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13):83-88.
WANG Songyan, ZHU Lingzhi, CHEN Ning, et al. A reactive power control strategy for wind farm based on hierarchical layered principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 83-88.
- [15] WANG Wei, ZHU Lingzhi, CHEN Ning, et al. Study on reactive power control strategy of wind farm for improving voltage stability[C]// Proceedings of 17th Conference of the Electrical Power Supply Industry, October 17-31, 2008, Macau, China.

朱凌志(1975—),男,通信作者,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定、电力系统规划、新能源发电及接入。E-mail:zhulingzhi@sgepri.sgcc.com.cn

陈宁(1983—),男,硕士,工程师,主要研究方向:风力发电系统接入及控制。E-mail:chenning8375@163.com

韩华玲(1985—),女,硕士,主要研究方向:风力发电系统接入及控制。E-mail:hanhualingok@163.com

Key Problems and Solutions of Wind Power Accommodation

ZHU Lingzhi, CHEN Ning, HAN Hualing

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Bulk scale wind power integration into the grid will breed new problems and challenges to power system operation and security. Based on the analysis of the wind power developmental characteristics in China and the experience of western countries, the paper summarizes the key factors which impact on wind power integration, including system regulation capability, transmission capability, technical performance of wind power, wind power dispatch levels, etc. Then some measures are proposed to improve wind power integration in China, such as reinforcement of peaking power and grid construction, breakthrough in key technologies of wind power integration and operation, and improvement of supporting policies and measures for wind power development.

This work is jointly supported by State Grid Corporation of China and National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A104).

Key words: wind power; grid-connection; accommodation; generation construction; dispatching and operation; policies and measures

附录 A



图 A1 2016 年西班牙电网规划图
Fig.A1 Planning picture of Spain's power network in 2016

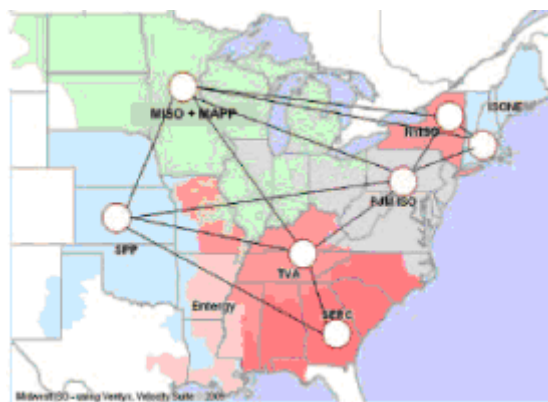
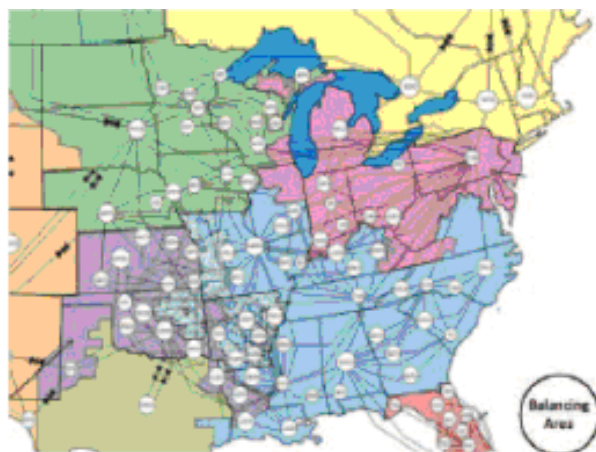


图 A2 美国东部电力系统目前和未来的平衡区域
Fig.A2 Balancing areas of eastern United State's power systems at present and in the future

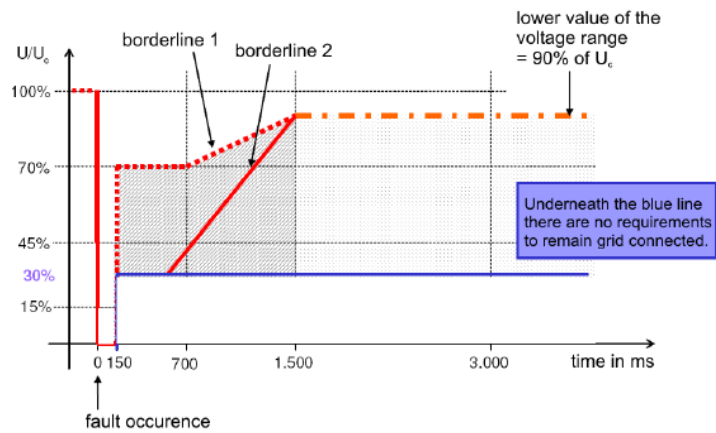


图 A3 德国并网标准关于低电压穿越的要求

Fig.A3 Requirement about low voltage ride through in German's grid-connected standard