

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.023

海上风电并网的关键技术与最新进展

唐洪良,周荣亮,孙 磊

(国网浙江杭州市余杭区供电公司,浙江 杭州 311100)

摘要:针对风电产业的发展趋势和海上风电场并网的研究现状,全面总结了海上风电并网的关键技术及其最新进展。首先分析了海上风电并网可能对大电网安全稳定运行带来的问题:一是对电网调度、电压控制和调频的影响,二是会改变电网潮流分布,三是对电能质量的影响。为解决这些问题,近年来海上风电并网在一些关键技术上取得了重要进展,包括低电压穿越、爬坡率控制、基于电压源换流器的柔性直流输电、无功补偿、功率输出的自动调节以及海上风电场的在线监测和故障诊断等技术。研究表明,海上风电是未来风电行业的主要发展方向,而风力发电并网运行是实现风能大规模开发利用的有效途径。最后提出了海上风电并网的未来研究热点和研究方向。

关键词:海上风电;并网;关键技术;最新进展

中图分类号:TM715

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0928-05

Latest development and key technologies of offshore wind power for grid integration

TANG Hong-liang, ZHOU Rong-liang, SUN Lei

(State Grid Zhejiang Hangzhou Yuhang Power Supply Company, Hangzhou 311100, China)

Abstract: Aiming at development trend of wind power industry and research status of grid integration of offshore wind farms, a review was given on the key technologies of offshore wind power for grid integration and latest development. First of all, influences of offshore wind power injection to safe and stable operation of power grid was analyzed systematically. Firstly, grid dispatching, voltage control and frequency regulation will be influenced. Secondly, power flow distribution will be changed. Thirdly, power quality will be effected. In order to solve these problems, some key technologies for grid integration of offshore wind power were studied in recent years, such as low voltage ride through, ramp rate control, flexible direct current transmission based on voltage source converter, reactive power compensation, automatic output power adjustment and on-line monitoring and fault diagnosis. The results indicate that offshore wind power is the main development direction of the wind power industry in the future, and grid integration is a high effective way for its large-scale exploitation and utilization. Finally, some research focus and research directions about grid integration of offshore wind power have been put forward.

Key words: offshore wind power; grid integration; key technologies; latest development

0 引 言

随着全球能源需求的快速增长和石油、煤炭等传统能源的过度开采,对新能源的探索、开发和利用已成为世界各国关注的焦点。在众多新能源中,风能是一种绿色清洁能源,也是一种可再生能源,又具备分布式

发电的特点,因此风力发电可视为我国电能可持续发展战略的最重要选择。近年来随着科技进步,风力发电逐渐由陆上延生到风能资源更为丰富的海上(据统计海上风电的可开发量是陆地的3倍^[1]),海上风电已成为全世界可再生能源发展领域的新增长点。我国近海5 m~25 m水深范围内风能资源潜在开发量约为

7 亿千瓦,而我国沿海地带又是人口稠密、经济发达、用电需求旺盛的地区。仅以浙江省为例,毗邻东海的地理位置和全年显著的季风气候,形成了极为丰富的海上风能,在杭州湾、舟山东部、宁波象山、台州湾和温州海域,都具备了建设大型海上风电场的条件,这对支撑浙江省的经济社会高速发展提供了极为有利的能源保障。

同陆地风电相比,海上风电场具有许多得天独厚的优点^[2]:①具有更高的风速(离岸 10 km 的海上风速比陆地高出 25%)和更低的风切变(风速随高度的变化)。由于海面比陆地更平滑,风切变较小,因此可以降低风电机的塔杆高度,减少建造成本。②具有较低的湍流强度。海上风能有稳定的主导风向,湍流更小,所以对风电机组形成的疲劳负荷较陆地更低,风机的使用寿命延长。③受环境影响小,也不会对环境保护造成破坏。建设海上风电场,受电磁干扰、噪声、鸟类等因素限制较少。另外海上风电场不占用土地,也不会产生有害物质和造成环境污染。④产出更高,经济效益更好。海上风电场可安装容量更大的风力发电机组,可以在更高的转速比下工作,因此输出的功率更大,经济效益较陆地风电更可观。

但是相对于欧洲发达国家,我国的海上风电场建设尚处于探索起步阶段,其中一个很大的问题就是海上风电的并网技术。在风电的能量转换过程中,风速的大小是随机变化的,因此风力发电一般不向负荷直接供电,其最经济有效的利用方法是并网发电,这也是海上风电能否得到大规模利用开发的关键。事实上,海上风电并网会对大电网本身造成一些问题,这就需要研究者全面评估海上风电并网对电网的冲击以及寻求解决这些问题所需要的关键技术。

本研究全面总结海上风电并网的关键技术与最新进展。

1 海上风电并网对电网的影响

大规模海上风电的并网实际上会对大电网的安全稳定运行造成一定的压力,甚至是成为一种安全隐患。由于海上风能是不可控、不可调的原动力(调控难度比陆地风能难得多),风电场输出的电力具有明显的波动性和间歇性,其变化规律也难以掌握,当海上风电并网规模达到一定程度时将会改变电网的潮流分布,传统电网的潮流控制将发生重大改变,会直接冲击电网的稳定性和安全运行。同时,由于海上风力发电的不确定性,将导致风能功率的波动而使得电网电能质量下降。具体而言,其主要影响有:

(1)会增加电网调度的困难,特别是电网调峰。

在现有科学技术条件下,风电的出力变化是难以预见的,也是很难控制的。特别是风电的出力变化与电网的负荷需求往往相反,例如炎热的夏季,城市空调用电量巨大而风力却不给力,出力较低,这就是所谓的反调峰特性(东北电网的风电反调峰概率可达 60%)。反调峰特性会增加电网调峰的难度,同时会加大用电峰谷差,距离电力“移峰填谷”的目标越来越远。由于调峰容量不足,一些地区电网不得不在低负荷时段弃风。由于海上风电的出力概率密度较陆上风电更高(尤其是当出力占装机容量的 85% 以上),海上风电的“反调峰”特点更明显,系统的调峰难度会更大,特别是在冬季如何消纳海上风电是一大难题。

(2)会加大电网电压控制和调频的难度。海上风电场的风速高,风力大,尤其是季风时期,风能资源极为丰富,此时风电出力大,而大量风电能源的远程输电往往会造成较高的线路压降值,同时风电场会从主网吸收大量的无功功率,造成电网的无功不足,电压稳定性就会受到影响(稳定裕度降低),增加了调压的难度。为支撑正常的系统电压,风电场沿线变电站的母线电压必须维持在额定电压的 1.1 倍甚至更高,调压容量不足,也会对输变电设备安全运行造成隐患。另外,海上风力的间歇性、随机性和波动幅度较大所引起的风电出力变化率较大(尤其是对小型风电场而言)会增加主电网调频的难度,需要通过限制风电接入率或增加储能装置加以解决。这里需要指出,由于海风较陆地风更平稳,风速的自相关函数衰减系数较小,即出力的波动性比起陆地风更低,海上风电并网对大电网调频的影响比陆上风电更小。

(3)风力发电机组抗扰动能力较差,会对大电网的安全运行带来影响。电力系统从发电、变电、配电到负荷,各种各样的微小扰动每时每刻都在发生(如小容量电机的投切、三相电压不平衡、架空线路的风摆等),在系统内产生小扰动时,风电机组会被迫退出运行(即脱网运行),这会引发连锁反应,会使周边更大区域内的风电场陷入脱网故障,从而导致事故扩大,使电网承受更大冲击。海上风电场由于受到风力和波浪的双重负荷,且所处环境、天气更加恶劣,要求解决防腐蚀、防盐雾等问题,机组发生故障的概率更大,而且维护人员无法快速接近风电场,故障检修与系统运维更加困难。

(4)海上风电固有的大间歇性和强随机性的特点会改变电网潮流,增加电网稳定运行的潜在风险。海上风电接入大电网后,会改变大电网的潮流流向和分布,增加了输电线路断面(即潮流断面,具有一定的稳

定限额值)的运维控制难度;海上风力发电在主网中的成分(称之为渗透率)增加后,导致在相同的负荷水平下,机组的等效转动惯量下降,影响电网的暂态稳定性;又如,并网的海上风电机组在大电网发生故障后可能由于励磁回路故障或绝缘击穿而无法重新建立端电压(即定子电压),引起机组失稳,从而破坏局部电网的电压稳定,给大电网带来二次冲击。

(5)电容电流的影响。在交流输送方式中,由于海上风电场要用一定电压(通常为 35 kV)的电缆与大陆电网连接,带大电容的海底电缆会产生较大的对地电容电流,产生高输电损耗。另外,我国 35 kV 及以下配电网仍大部分采用中性点不接地方式运行,如果海上风电场采用 35 kV 不接地系统,由于电容电流的增大,会危及海上风电场的正常运行。

(6)对电能质量的影响。由于海上风向、风力的随机变化会使得风电机组的功率输出是不稳定的,并入主网后会影响到大电网的电能质量,主要是谐波、电压波动与闪变以及三相不平衡等问题^[3]:

①谐波。海上风电并网会给大电网带来谐波污染,主要是由以下两方面的问题造成的:一是电力电子装置所引发的谐波污染。众所周知,电力电子装置本质上是一种非线性负载,属于典型的谐波源,会带来较严重的谐波干扰。海上风电机组,尤其是采用高压直流输电方式(HVDC)连接并网的风电机组,由于采用大量的交/直流变流装置(整流器、逆变器等),所产生的谐波污染尤为突出。特别是双馈发电机组励磁控制电路中的电力电子装置,也会给系统带来不可忽略的谐波影响^[4]。二是大型风力发电机组并网时会从主网吸走大量的无功功率,这就需要对其进行无功补偿,而由于无功补偿的并联电容器可能和系统中的谐波源发生并联谐振,从而加剧谐波污染^[5]。

②电压波动和闪变。对风力发电机组而言,目前广泛采用晶闸管软并网方式,以限制启动时产生的冲击电流影响,但冲击电流仍无法消除。当风速超过某上限值(称为切出风速,即风力发电机组并网发电的最大风速,超过该值机组将切出电网)时,风力发电机将自动脱网运行。如果整个风电场所有机组同时脱网,这种冲击对大电网电压尤其是配网的影响将是剧烈的。不但如此,海上风速的多变性以及风力机的剪切效应、塔影效应等动态效应的影响,都会导致风电输出功率的波动^[6]。而这种波动发生在 25 Hz 以内,该频段恰恰是产生电压闪变的频率范围,因此,风力发电机组给大电网带来的闪变问题是比较普遍的。

除了以上影响以外,电网末端的电能质量反过来

也会对风电场产生影响:电网故障或扰动会导致风电场解列,不平衡电压会造成机组振动、过热等后果。

2 海上风电并网的关键技术与进展

在全面评估海上风电并网对电网影响的基础上,一个运行良好的海上风电场要与大电网联接,必须具备以下几个能力或采用以下关键技术:

(1)风机的故障穿越能力,尤其是低电压穿越能力。与火电或水电不同,风的大小是不稳定的,不受人控制的,尤其是海上风能。因此风力发电机组多是异步或永磁式,无励磁调节系统。在电网出现故障的时候电网电压值会下降,此时风电机组不能及时做出反应,而继续向外输出功率,会引起振荡,直至跳闸停机保护,对电网和风电场都造成冲击。如果风电机组具备低电压穿越功能,就可以在电网故障时保持一段时间的低电压输出而不脱网,在此期间电网解决故障并恢复正常,风机即可恢复正常工作,这对电网和风机都是一种保护。2008 年西班牙发布了并网风电机组故障穿越能力标准,要求风机在 500 ms 内不能脱网、在电压波动上下 5% 范围内,风电场必须持续 1 h 正常并网运行。由于该标准得到严格执行,西班牙已成功地解决了并网风电故障穿越问题。反观国内,国家电网公司于 2009 年制定的《风电场接入电网技术规定》,要求风电机组具有在并网点电压跌至 20% 额定电压时能够保证不脱网连续运行 625 ms 的能力,但现实是目前我国现有 80% 风电机组还不具备低电压穿越能力,需要进行技术改造。具体到海上风电,由于海风波动性较小,其低电压穿越的控制算法和陆上风电有所区别,据报道河北保定天威的 3 MW 高速永磁型海上风电机组已通过低电压穿越的测试,但尚未投入实际运行。

(2)风电场的爬坡控制能力。海上风电场爬坡能力是指海上风机能根据电网调度指令调节发电出力,并且出力变化速度(即爬坡率)低于一定阈值。另外,在风速高于切出风速时,同一海上风场风机不能同时脱网,以保证火电等常规机组有一定时间替代之。在该项技术的研发方面,国内外取得了不少研究成果。如美国 AWS Truewind 公司开发了一套计算机系统用以预测风电爬坡,该系统能够预测爬坡概率结果、输出功率预测结果以及风速变化趋势图,并已在美国德克萨斯电网投入运行,能够提前 5 h ~ 6 h 预测出爬坡事件,但预测精度有待进一步改进。国内在风电爬坡有限控制研究方面也有不少成果,如文献[7]采用一种基于优先级顺序(与机组状态相关)的协调策略以控制风电场内的风机出力,既增强了风电场有功输出的

可控可调能力,又改善了风场的爬坡控制能力。为抑制爬坡率,文献[8]提出一种风储联合控制方法,该方法结合弃风和储能手段(如冲放电电池),以风电场运营成本为最小化目标函数,利用有功功率输出的预测数据进行滚动优化控制,确保爬坡率抑制在国家风电并网标准中的相关要求值以内。

(3)海上风电并网的输送方式可分为3大类:高压交流输电(HVAC)、高压直流输电(HVDC)和基于电压源换流器的轻型高压直流输电技术(VSC-HVDC)。小型的近海风电场,一般采用技术成熟、成本较低的HVAC方式。对于离岸较远的海上风电场,宜HVDC或VSC-HVDC方式。相对于传统的HVAC,VSC-HVDC具有明显优势:一是直流输电没有对地电容造成的输电距离限制;二是采用两极配置时,导线(电缆)数由3条减为2条;三是VSC-HVDC技术利用电压源变流器等直流换流装置将风电场内部交流系统与外部大电网有效地隔离开,这样海上风电的强随机性、高间歇性和大波动性对主网的负面影响就减轻到最小程度,从而也放松了对海上风电场装机容量的限制;四是该技术具有“组件化”的灵活思想,非常便于扩展,且能够独立地扩展风电机组的无功功率和有功功率,在发电和负荷快速变化的极端情况下,也能较好地增强大电网的稳定性,还可以消除塔影效应等引发的电压闪变,改善电能质量^[9]。基于VSC-HVDC技术的海上风电场并网示意图如图1所示。鉴于VSC-HVDC技术的优势,许多国家把它作为海上风电并网的首选技术。截止到2011年,世界范围内已投入运行的风电场柔性直流输电工程共12项(其中5项为海上风电项目)。德国日前竣工(2013年8月)的最大海上风电园BARD Offshore 1(发电功率达400 MW)也将采用这一技术于2014年2月并入陆地电网,我国于2011年5月建成了上海南汇风电场柔性直流输电示范工程,但在海上风电应用方面尚处于跟踪和技术储备阶段(2010年竣工并网的海上东海大桥海上风电场采用HVAC方式)。

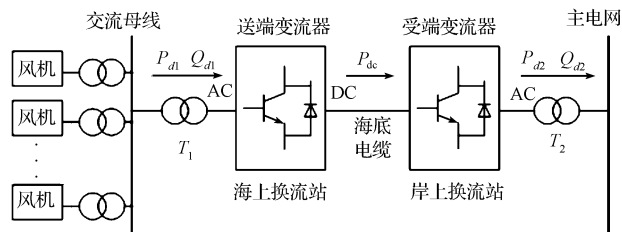


图1 基于VSC-HVDC技术的海上风电场并网示意图

(4)海上风电场应具备为大电网提供无功功率补偿的能力和响应电网频率变化自动调节出力的能力。

这其实也是VSC-HVDC输电技术的优势所在。进一步分析,VSC-HVDC技术的核心部件是两端的电压源变流器(VSC)。变流器既是能量转换部件,对电网输送风机的出力,又是一个控制单元,能调节电网端无功分量,起到无功补偿的作用。VSC以具有高频通断功能的开关器件(如IGBT-绝缘栅极双极晶体管)为核心部件,以脉宽调节控制方式对变流电路中的电力电子器件进行通断控制,在高、低电平间上、下快速切换产生交流电压,并通过交流低通滤波得到基波电压。使用脉宽调节控制技术的优点在于可随时改变交流输出电压的相位与幅值,从而实现有功功率和无功功率的独立调节,经该变流电路产生的交流电压可随控制器的变化而变化,非常灵活^[10]。目前国际上对于VSC的研究焦点在于变流器的拓扑结构设计及其调制和均压控制方法^[11],其中最新的拓扑结构是采用多电平变流器(包括多电平重注入变流器、有源箝位多电平变流器、多重化变流器和模块化多电平变流器等)。大容量变流器的核心技术主要为ABB、西门子等国外公司所拥有,并已在一些大型海上风电场项目上得到成功应用,我国在该项技术上的研究还有待努力。

(5)要能够对并网风电机组进行在线监测和运行状态评估。由于风力大小、风向的不确定和难以预测,使得风电机组在不同运行状态之间频繁切换,导致风电机组各部件的随机性、动态性和相关性的特征明显,加之工作环境恶劣,各部件因负荷、磨损和腐蚀造成机械性能(如绝缘强度、疲劳强度等)下降,风机的运行性能随运行时间的增长而逐年下降。相比陆地风电,由于海水深度不同、海床结构复杂多变^[12],加之可达性差,海上风电机组面临更恶劣的运行环境和更高的运行维护成本,因此快速、精确、全方位地监测和评估风电机组的运行状态和实现机组故障诊断,将内部故障成本降低到最小,对于海上风电场的高效运行和有效维护,实现大规模海上风电安全高效并网具有重要意义^[13]。国外有许多公司致力于第三方海上风电机组监控系统的研发,例如:英国Garrad Hassan公司的GH SCADA系统,丹麦Vestas Online系统,德国SKF公司的SKF Wind Con 2.0,美国赛风公司的Second-WIND-ADMS系统等。这些系统的实用化水平较高,除了具有数据采集、故障诊断和分析风电机组运行状态的基本功能外,还包含了风电机组安全运行、无功功率优化控制、风电机组优化运行等高级功能^[14]。我国风电生产厂家也积极投入到风电机组的状态监测系统的研发中,如金风科技、华锐风电等国内风电巨头都为自行生产的风电机组配备了监控系统,南瑞电控所开

发的 NS2000W 系统已应用于宁夏某风电场的综合监控系统项目中。

3 结束语

海上风电的并网是一项极具理论意义和实用价值的研究课题,在当前乃至今后相当长一段时间内都会是国内外研究开发热点。今后的关注重点可能集中在以下几方面:

一是 VSC-HVDC 技术的进一步完善。包括 VSC 拓扑结构的优化、直流换流站的控制策略研究、STATCOM 与换流站控制的配合问题以及在电网故障情况下, HVDC 系统的故障后恢复能力等^[15]。

二是海上风电机组并网在线监测系统的智能化程度有待提高。例如,海上风电机组状态健康检测要实现分布式处理和具有一定的自愈能力;风电机组的故障诊断要由传统方法向智能化方法发展(如模糊识别、粒子群方法、粗糙集方法等)。

三是海上风电要突破大规模并网的瓶颈,还要依靠智能电网建设进程的加快。海上风能的大规模利用必须要与大电网实现并网,而对于并网最基本的要求就是海上风电输出电压、频率和相位要与大电网保持一致。过去在风电控制领域,主要采用变桨距和变速箱等技术,但方法陈旧,控制难度也较大。随着智能控制技术的日益进步,人们正寻求以智能控制来代替传统控制方法。智能电网建立在高速集成的双向通信网络基础上,依靠先进的传感测量技术和控制方法,可以合理配置电能输送、有效优化电网调度、增强电网抗故障能力,因此智能电网是海上风电大规模并网的有效途径。2013 年 3 月,广东珠海万山海岛新能源微电网示范项目获批建设,这是国内首个海上风电与海岛新能源智能电网应用整合研究项目,该项目将风电、太阳能光伏发电和燃料电池等多种发电单元融合一体,建设满足用户侧需求的智能微网系统,这也代表了海上风电未来的发展方向。

四是健全海上风电的标准体系。2011 年,国家能源局审定并公布了包括“大型风电场并网设计技术规范”在内的 18 项风电行业技术标准。但是在原有的 200 多项技术标准中,涉及海上风电的只有 24 项,因

此未来还要加快海上风电场建设、运营维护及并网方面的标准制定工作。

参考文献(References):

- [1] 肖运启,贾淑娟.我国海上风电发展现状与技术分析[J].华东电力,2010,38(2):277-280.
- [2] 李杰.海上风电场的电网接入技术研究[D].合肥:安徽理工大学电气与信息工程学院,2011.
- [3] LV X Y, CHANG X F, LI D X, et al. Research on Detection Method of Power Quality for Wind Power Connected to Grid[C]// Proceedings of 4th International Conference of Electronic System Integration Technology. Amsterdam: [s. n.], 2012:1553-1558.
- [4] 弭勇,李和明,李永刚.含双馈异步风电机组的风电场电能质量分析[J].山西电力,2012(6):29-31.
- [5] 缪源诚.大型海上风电场并网对配电网的影响探讨[J].供用电,2010,27(3):15-19.
- [6] 白鸿斌,王瑞红.风电场并网对电网电能质量的影响分析[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(1):120-124.
- [7] 戚永志,刘玉田.风电高风险爬坡有限度控制[J].中国电机工程学报,2013,33(13):69-75.
- [8] 王颖,张凯锋,付嘉渝,等.抑制风电爬坡率的风储联合优化控制方法[J].电力系统自动化,2013,37(13):17-23.
- [9] 姚伟,程时杰,文劲宇.直流输电技术在海上风电场并网中的应用[J].中国电力,2007,40(10):70-74.
- [10] 李响,王志新,刘文晋.海上风电柔性直流输电变流器的研究与开发[J].电力自动化设备,2009,29(2):10-15.
- [11] 王志新,吴杰,徐烈,等.大型海上风电场并网 VSC-HVDC 变流器关键技术[J].中国电机工程学报,2013,33(19):14-26.
- [12] 王凡,赵蒙莉,陈晓静,等.不同 P-Y 数据对于海上风电机组结构频率影响分析[J].机电工程,2012,29(10):1220-1223.
- [13] 李辉,胡姚刚,唐显龙,等.并网风电机组在线运行状态评估方法[J].中国电机工程学报,2010,30(33):103-109.
- [14] 傅质馨,袁越.海上风电机组状态监控技术研究现状与展望[J].电力系统自动化,2012,36(21):121-129.
- [15] 韩仲卿,孟海燕.浅谈海上风电场电力系统[J].华北电力技术,2010(12):26-28.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

唐洪良,周荣亮,孙磊.海上风电并网的关键技术与最新进展[J].机电工程,2014,31(7):928-932.

TANG Hong-liang, ZHOU Rong-liang, SUN Lei. Latest development and key technologies of offshore wind power for grid integration[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(7):928-932.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>