

海上风电场电气系统现状分析

黄玲玲^{1,2}, 曹家麟², 符杨¹

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 海上风电发展呈现风电场容量扩大、离岸距离增加、并网要求标准化的特点, 这为海上风电场电气系统设计带来重大挑战。大规模海上风电场电气系统与传统电厂相比, 具有鲜明的要求与特点。在阐述了现有几种海上风电场电气系统接线方案的基础上, 对目前海上电气设备的技术特点与成本状态进行了分析与比较, 并就目前海上风电场电气系统研究存在的主要问题与前景进行了展望。

关键词: 海上风电场; 电气系统; 交流; 直流

Review of electrical systems for offshore wind farms

HUANG Ling-ling^{1,2}, CAO Jia-lin², FU Yang¹

(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. School of Mechanical & Electronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The development of offshore wind industry demonstrates the capacity expansion of a single wind farm, the increase of the off-shore distance and the standardization of grid integration. These all bring big challenges for the electrical system designs of offshore wind farms. Comparing with traditional power plants, the big offshore wind farm has its unique characters and requirements. This paper describes several existing electric topologies for offshore wind farms, compares the costs and some technical issues of the offshore electric equipment and discusses the problems and prospects of the electrical systems in application for the real offshore wind projects.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177098).

Key words: offshore wind farm; electrical system; AC; DC

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)10-0147-08

0 引言

海上风电作为拥有巨大潜力的大规模可再生能源, 在各国节能减排的要求以及各国政府有力的财政政策支持下, 已经成为未来风能利用的必然趋势。据全球风能理事会统计, 截止到2012年底, 全球新增海上风电装机约1 290 MW, 累计约5 410 MW^[1]。从世界各国海上风电的发展与规划来看, 海上风电发展表现出风电场容量逐渐增加与离岸距离不断扩大等特点。

自1991年丹麦建成全球首个海上风电场开始, 海上风电场的规模呈现逐年递增的状态。Horns Rev

作为全球首个大型海上风电场, 装机容量为160 MW, 离岸距离为15 km。截止到目前为止, 全球规模最大的并网运行海上风电场是英国的London Array 1海上风电场, 其装机容量达到630 MW, 离岸距离超过20 km。而规划中的超大规模海上风电场装机容量甚至达到2 500 MW, 远海风电场(far offshore wind farm)离岸距离则可能达到50~60 km^[2]。

大规模远距离海上风电场可能意味着更多数量的风电机组和更长距离的电能传输要求。众所周知, 海上环境恶劣, 电气设备需要专门的防护措施, 价格也远远高于陆上。海上条件特殊, 施工需要借助专门的工具与设备, 因此, 建设与运行维护成本也大大高于陆上^[3]。为了实现海上风电场经济可靠地并网运行, 就需要对海上风电场的电气系统提出一些特殊要求。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177098); 上海市科委地方能力项目(Z2013062); 上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900)

本文在讨论了大规模海上风电场电气系统基本特点的基础上,对现有的海上风电场电气系统连接方案进行了分析与比较,并进一步讨论了海上风电场电气系统研究目前存在的主要问题和发展前景。

1 大规模海上风电场特点

海上风电场由于地理环境与发电形式的问题,其电气系统与传统电厂存在极大不同。在进行海上风电场电气系统规划与设计时,除了要考虑传统的电气设计要求之外,还需要注意以下几个方面:

1) 风电机组数量多。虽然风电机组单机容量不断增大,但以目前运行的海上风电场来看,海上风电机组单机容量大都集中在 2~6 MW 之间,因此,一个大型海上风电场通常装设有几十台甚至上百台的发电机组。如 Horn Rev I 与 London Array 海上风电场分别由 80 台 2 MW 风电机组与 175 台 3.5 MW 风电机组构成。

1) 风电场内部电气线路长。由于受到风机桨叶长度与风机间尾流的限制与影响,海上风机间距通常为 5R~6R,即 500~600 m 左右^[4]。另外,近海海上风电场(除滩涂风电场)离岸距离通常都超过 10 km,而规划中的远海风电场离岸距离甚至已经超过 30 km,因此,大规模海上风电场内部需要敷设数十公里甚至上百公里的电缆线路。如东海大桥海上风电场离岸距离约 13 km,内部 35 kV 海底电缆敷设长度约 70 km。

2) 海上的特殊限制。一般认为海上风电场不像陆上风电场,需要考虑线路走廊、建筑物、树木的影响问题,规划和建设相对较为自由,可以简单的以取两点间直线距离最短的方法选择海缆路由。但是由于海底电缆的敷设与维护需要借助专门的船只与敷设工具,并且海底有其特殊的地形条件与环境,因此,还需要考虑其他很多因素。理想的海底电缆路由,应远离繁忙航道,选择水深较浅,水流速度较小,坡度平缓,地质以淤泥、黏土或砂质土等为适宜的区域。

3) 海上风电场可进入性差。海上作业需要借助船只或直升机进行,不仅作业成本高,并且对能见度以及海上风浪都有一定的限制。现场经验表明,海上维护检修工作一般在非雨雾天气且风速<15 m/s、浪高<2 m 条件下方可进行。因此,要求海上风电场电气系统具有更高的可靠性与更全面的远程监控系统。

2 海上风电场电气系统

为了收集散布在风电场各处的风电机组发出的

电能,海上风电场电气系统通过海底电缆以一定的形式将机组连接起来,并将电能输送至电网。从结构上看,通常可以划分为集电系统、海上升压平台与输电系统三个部分。集电系统通过中压海底电缆将各风电机组相互连接,并接入相应的升压站。海上升压平台将各“串”风机以一定的主接线形式连接,并根据需要将电压等级升高。输电系统通过高压海底电缆将风电场接入系统并网点。图 1 为一个典型大规模海上风电场电气系统结构图。目前常用的结构形式主要有三种:交流系统、交直流混合系统以及直流系统。

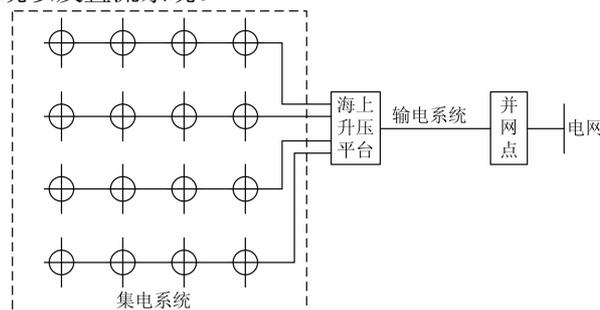


图 1 大规模海上风电场电气系统结构图

Fig. 1 Electrical structure of a large offshore wind farm

2.1 交流系统

由于目前海上风电机组大都采用 690 V 的机端电压,为了减少风电场内部电能传输的损耗,常见的做法是在风电机组出口装设箱式变压器将电压等级升高。综合设备成本与传输损耗的因素,普遍认为 30~36 kV 是交流电气系统中风机之间连接的最佳电压等级^[5]。

当海上风电场容量小于 100 MW、离岸距离小于 15 km 时,通常无需装设海上变电站,直接通过中压线路连接至陆上变电站后,接入电网。当风电场规模较大、离岸距离较远时,可以采用海上变电站将电压等级升高,经高压输电线路连接至并网点^[6]。根据 Lundberg^[7]的划分方法,这两种方式可分别称为小交流系统与大交流系统。上海东海大桥海上风电场与丹麦 Horn Rev 海上风电场分别采用的是上述两种接线方式。

2.2 交直流混合系统

大规模的海上风电场并网不仅需要考虑到数十公里的海底电缆电能输送的经济性问题,还需要充分考虑其对电网运行的稳定性影响。采用高压直流输电联网是一种既能满足风电场并网导则又具有较高经济性的风电场并网方式^[8-11]。

交直流混合系统,即是采用交流集电系统将海上风电机组连接成串,接入海上换流站,然后采用

高压直流输电的方式, 将风电场接入电网。其接线方式具体如图 2 所示。基于当前直流输电技术的发展情况, 当海上风电场容量大于 100 MW, 离岸距离超过 90 km 时, 采用基于电压源换流的柔性直流输电方式 (VSC-HVDC) 更经济^[12]。当风电场容量大于 350 MW、离岸距离超过 100 km 时, 则可以考虑采用传统的 HVDC 输电方式^[13]。

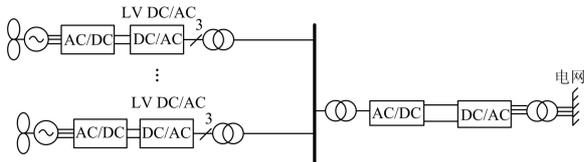


图 2 交直流混合电气系统
Fig. 2 AC/DC hybrid electrical system

2.3 直流系统

随着柔性直流输电技术的快速发展, 直流输电在较低电压等级和较短输电距离时也具备了一定的竞争力。尤其是直流输电方式在海上风电场实现工程化以后, 直流方式在集电系统中也获得了越来越多的关注。

在直流集电系统中, 风力发电机组是通过一组 AC/DC/DC 变换器将电压升高至中压水平。为了与海上风电场高压直流输电线路相互连接, 直流集电系统目前主要有两种设计思路: 并联连接与串联连接。并联连接采用 DC/DC 换流站将中压直流升高至高压水平, 如 150 kV, 然后通过直流输电线路, 经陆上 DC/AC 换流站接入电网。而串联连接则采用海底电缆将风电机组相互串联, 以获得 N 倍的直流电压, 达到升压的目的。然后同样经过高压直流输电线路和陆上 DC/AC 换流站接入电网^[14-15]。具体接线如图 3 和图 4 所示。直流系统目前还处于设想与研究阶段。

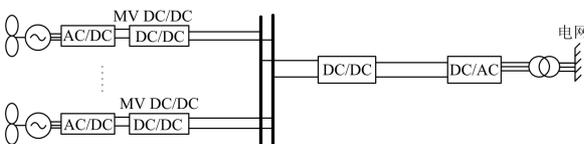


图 3 并联直流系统
Fig. 3 Parallel DC system

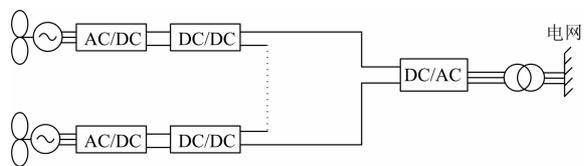


图 4 串联直流电气系统
Fig. 4 Serial DC system

3 分析与比较

3.1 交直流集电系统

对比图 2~图 4 所示并联直流集电系统与交流集电系统, 主要有两点区别:

①线路回路数。海上风电场集电系统采用电缆线路, 即交流集电系统通常采用三芯海缆, 而直流集电系统则采用单芯海缆。因此, 交流集电系统只需要 1 根电缆, 而并联直流集电系统则需要 2 根电缆。这不仅影响海底电缆成本, 也将对海缆的敷设费用造成影响。

在电缆成本方面, 与直流电缆相比, 交流电缆通常为三相四线制或三相五线制, 绝缘安全要求更高, 结构较复杂, 因此, 成本也高出许多。但是, 对于相同截面的交直流电缆来说, 从表 1 可以看出, 30 kV 的直流海底电缆与 35 kV 的交流海底电缆能够承载的负荷相差不大。也就是说, 对于相同的风电机组来说, 采用 30 kV 直流系统时输出的电流几乎是 35 kV 交流系统输出电流的 2 倍, 即相同数量的风力发电机组构成的串型结构所需要的直流电缆的截面可能远远大于所需要的交流电缆。

表 1 中压交直流电缆数据^[16]

Table 1 MV DC cables and AC cables

±30 kV 海缆输送 功率	截面/ mm ²	95	120	150	185
	并排敷设/ MW	17.1	19.5	21.9	25.2
	重量/ (kg/m)	5.1	5.5	6	6.6
	外径/mm	44.2	45.6	47.2	48.8
35 kV、 三相海缆	截面/ (3×mm ²)	95	120	150	185
	设计功率/ MVA	15.1	17	18.9	21.1
	重量/ (kg/m)	30.2	32.4	34.8	37.2
	外径/mm	113.5	117.4	121.7	129.5

在安装费用方面, 海缆的敷设费用高昂。而相同导体截面的交流海底电缆其外径远远大于相同导体截面的直流电缆, 使得交流电缆在船只上的盘绕与搬运都更加困难与复杂。同时相同长度的交流海底电缆的重量也远远大于直流电缆, 因此, 交流海底电缆的敷设一般要高于直流海底电缆。但是, 考虑到海底电缆敷设需要 25~50 m 的间距, 与交流集电系统相比, 直流集电系统的海缆敷设工作量可能

较大, 所需要的风电场海域租赁费用也相对较高。

②中压变流器。并联 DC 集电系统中需采用 DC/DC 变压器将风机出口较低的电压等级, 升高至中压水平。虽然 DC/DC 变流器有许多设计方式, 但是, 在目前的电力电子技术条件下, 当直流升压变比大于 10 时, 则需要采用具有电隔离的 DC/DC 变流器结构, 类似 DC/AC-变压器-AC/DC 的形式^[7]。即可以认为, 与交流集电系统相比, 并联直流集电系统需在每台风机出口增加一台中压 AC/DC 变流器。该变流器容量与海上风机容量相匹配, 与中压集电系统相连接, 因此, 可以认为是一台容量为 3~10 MW 之间, 电压等级为 30~36 kV 之间的换流器。在保证风机并网要求的基础上, 该变流器需要大量大功率 IGBT 串联, 这不仅涉及 IGBT 串联均压的问题, 增加了约 3%左右的损耗, 还涉及器件的高压绝缘问题。这在现有 IGBT 成本的前提下是非常不经济的。此外, 两级 DC/DC 升压变流器产生的网络损耗也是非常可观的^[17]。

相比较而言, 串联直流集电系统在海上升压平台方面表现出了巨大优势。这不仅节省了海上平台费用, 也大大降低了风电场的运行维护费用。虽然目前已有许多相关文献, 对该方式下的风电场控制、断路器设计以及保护要求等方面进行了不同程度的研究^[7,18]。但是该连接方式的缺点也是非常明显的。与并联直流集电系统类似, 串联系统需要为每台风机增设一台容量与风电机容量相匹配、同时与高压输电线路相连的变流器。对于这种设计电压为 150 kV 甚至更高, 而设计容量为 3~10 MW 的变流器, 在目前单个电力电子器件耐压水平有限的条件下, 是非常不经济的。另外, 由于风功率的波动性, 如何维持串联直流侧的电压也是该连接方式需要关注的问题。

总之, 在现有的技术条件下, 交流集电系统是当前最经济安全性最好的选择。

3.2 海上升压站

根据上述三种方式, 海上升压站可以分成两种形式: 海上变电站与海上换流站。

由于海上升压站建设在海面上, 不仅容易受到大风与海浪的冲击, 也易受到海水、盐雾水汽腐蚀的影响, 因此, 不仅海上平台的每平方米的空间都由钢结构与混凝土构成, 而且其中的电气设备也多选择户内型设备与 GIS 设备。也就是说海上升压站成本不仅需要考虑电气设备成本, 还包含海上平台费用。

自 2002 年, Horns Rev 海上风电场建成第一个海上变电站开始, 目前已经建成 22 个海上风电变电

站。虽然数量不少, 但是大都位于欧洲地区, 电压等级大都采用 33 kV/132 kV。另外, 现有的海上风电变电站基本都属于专门项目专门定制, 技术水平还不成熟。相关的设计标准目前也仅有主要侧重于安全考虑的 DNV-OS-J201 标准。结合 Barrow 与 Gunfleet Sands 海上风电变电站数据推断, 海上变电站目前成本约为 10 万欧元/MVA^[19]。

由于海上风电场电气系统设计基本在风机选址完成后, 因此, 对于容量基本确定的海上变电站设计来说, 主要有两个问题: ①海上变电站的位置: 将决定集电系统与输电系统线路长度。对于只有一个海上变电站的风电场来说, 变电站的位置, 通常倾向于位于风电场中心或者风电场靠并网点侧的某个位置。至于具体位置, 则需要具体工程具体分析。文献^[20]大致做了研究, 取 DDR 为风电场离岸距离与风电场圆形涵盖区域的半径的比值, 认为当 DDR 大于 4~8 时, 变电站位于风电场靠并网点侧为宜; 当 DDR 小于 1 时, 变电站位于风电场几何中心为宜。②变压器数量: 主要影响海上升压平台面积与重量。陆上变电站基于 $N-1$ 原则考虑, 通常采用两台并联变压器的形式, 而海上风电场由于风速通常低于风机额定功率风速, 同时, 从减少运行维护成本的角度考虑, 海上变电站免维护设计思路, 大大提高了变压器的可靠性, 因此, 目前的趋势是在可能的情况下使用一台变压器。

柔性直流输电由于具有有功功率和无功功率独立控制、无需额外增加无功补偿设备、可以隔离故障影响等优点, 在海上风电场获得了较大关注并获得了实际应用^[8]。德国 Borkum2 海上风电场建成了目前全球首个海上换流站, 采用的是 VSC-HVDC 输电形式。从成本上看, 海上换流站中 VSC-HVDC 换流器站约占整个换流站成本的 85%, 目前换流站成本约为 11 万欧元/MW^[13]。与海上变电站成本大体相当。

制约柔性直流输电技术发展的主要问题是其损耗相对较高。直流输电工程的损耗包括两端换流站损耗、线路损耗和接地极系统损耗三个部分, 常规直流输电换流站损耗占换流站额定功率的 0.5%~1%, 而柔性直流输电, 由于开关频率高, 其换流站损耗可达到额定量的 1.5%~6%。文献^[17]对 500 MW 和 1 000 MW 海上风电场交直流输电系统损耗进行分析比较, 结论显示当输电线路距离小于 55~70 km (与海上风电场容量有关) 时, 交流输电方式损耗最小, 约占风电场容量的 1%左右, 当距离增加时 LCC-HVDC 输电方式损耗最小, 其中, VSC-HVDC 网络损耗最大, 约高出最低损耗 3 个百

分点左右。

以上仅仅是从经济性的角度对海上风电场交直流输电系统做了比较,事实上,目前许多基于VSC-HVDC输电系统的海上风电场都属于示范性工程,其主要目的测试海上风电场有功无功调节和维持电网稳定性的能力,为新能源发电替代传统同步发电机电厂奠定基础。因此,海上风电场的直流并网还具有新能源发展的前瞻性意义。

3.3 保护与监控系统

海上风电场由于可进入性差,为了保证电气系统一次设备经济可靠地运行,二次设备需要协助尽量实现“少停电,少出海”,因此,海上风电场对保护与监控系统具有更强的依赖性,需要对每个电气设备进行更全面、智能的监控与分析并保证数据采集与通信系统高可靠性。

就继电保护来说,海上风电场不仅对设备的远程监控能力具有更高的要求,而且需要尽量实现对故障的定位与恢复。例如,在开关设备的选择上,风机出口箱变就不能由于成本问题选用熔断器,必须安装断路器及相应的继电保护装置。在重合闸的设置上,海底电缆故障由于主要是绝缘损坏造成的,属于永久性故障且修复时间较长。为了提高风电机组利用率,则需要结合相对精确的故障定位进行故障切除与重合,尽快恢复非故障部分并网发电。

总的来说,交流集电系统保护配置方式与辐射型配电网保护配置大致相同,只是考虑到风电机组的故障穿越能力与集电系统运行可靠性,中压线路保护可能需要多设方向元件或者采用纵差保护,同时多电源特性也使得集电系统线路保护整定计算更加复杂。此外,考虑到海底电缆线路充电功率较大,还需要特别注意断路器分闸操作时变压器与海底电缆的暂态充放电引起的过电压问题^[21]。直流集电系统的保护配置问题可以参考海军船舶供电系统。但是仍存在以下两个方面的问题:一是直流开关设备的设计与经济性问题仍未得到很好的解决,二是许多直流系统保护都是在变流器交流侧实现的^[15]。此外,由于结构的限制,重合闸不适用于串联直流系统,这可能对其可靠性产生一定的影响。

4 热点与展望

4.1 研究热点

从上述分析可以看出,海上风电场电气系统有鲜明的特点与特殊的要求,根据不同的容量、离岸距离以及其他控制要求,海上风电场电气系统有多种选择方案。由于目前海上风电发展还处于起步阶段,许多工程项目仍处于规划与设计之中,因此,对

海上风电场电气系统最关注的问题主要集中在经济性与可靠性两个方面。

① 经济性

考虑到海上施工条件的限制,电气系统的成本在整个海上风电场成本中的比例约为15%~30%左右^[22],其中海底电缆成本达到8%^[23]。根据中国风力发电网消息,以每千瓦风电装机容量测算,东海大桥海上风电场投资约为2.3万元/kW。由此,对于100 MW以上容量的大型海上风电场来说,集电系统成本是非常显著的。因此,目前对海上风电场电气系统优化研究大都集中在电气系统连接形式的优化,根据内部电气设备构成进行数学建模,采用相应的智能方法进行求解,以期获得最佳的经济性。

文献[22-25]从风电场集电系统电气设备成本经济性的角度考虑,建立数学模型,优化风电场集电系统的拓扑结构。文献[23-24]结合海上变电站容量和数量的优化,建立了基于大型海上风电场投资成本最小的数学模型,并采用遗传算法优化电气系统的规划。文献[26]在给定停运率约束条件下,建立最佳经济模型,优化大型直流输电海上风电场的电气系统。

② 可靠性

海上风电场运行条件十分恶劣,电气系统更是大型海上风电场运行中最易发生故障的部分之一^[27]。同时,海上风电场集电系统一旦发生故障,其维护、检修工作的条件更恶劣、难度更大,因此,海上风电场运行部门已开始高度重视这一问题,力求在海上风电场规划设计阶段便对可靠性进行科学的评估和规划。

为了获得更好的可靠性,海上风电场集电系统除了考虑单一辐射型接线模式之外,还可以采用数量更多、层次更深的分支结构,或者如文献[22]中所示的具有不同冗余程度的环形连接结构。文献[28]还在传统开关配置方案的基础上提出了开关完全配置方案和开关部分配置方案,并进行了成本比较。

在进行海上风电场电气系统设计阶段充分考虑今后的电气设备的修复工作的展开也是非常必要的。以海底电缆为例,年故障率可达0.01~0.03次/a.km,为了便于进行打捞式修理,在选择海缆长度时需考虑一定的裕量。文献[29]对此进行研究,认为取平均裕量3%~6%为宜。

此外,还有许多文献专门针对海上风电机组的状态监控以及基于可靠性的运行维护等方面进行研究以提高风电场电气系统的可靠性^[30-32]。

4.2 展望

① 研究成果的工程实用性有待提高

海上风电场电气系统优化问题本质上是电力系统的规划问题,必须符合系统规划中的相关标准^[33-34]。目前所有文献中的方法都缺少对所选电气设备的校验。尤其是海底电缆的选择,文献[22-25]只考虑了负载电流,文献[24]考虑了电缆压降校验,但是,都缺少热稳定校验,难以保证最终方案的经济性与可靠性。另外,风电机组大都具备低电压穿越的能力^[35],因此,在进行海缆的热稳定校验时,还需考虑风电机组提供的短路电流。以图5所示海上风电场为例,当仅考虑负载电流时,海缆1选择 70 mm^2 的截面即可;若进行短路电流校验,则需更换为 120 mm^2 的截面。费用约相差20万元/km,海缆运行的可靠性也相差甚远。

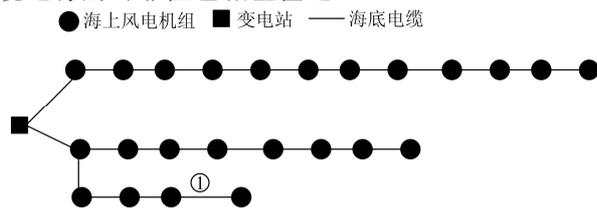


图5 某海上风电场接线图

Fig. 5 Connection of an offshore wind farm

另外,由于海底的特殊环境,在进行海缆路由选择时,目前研究大都取风机之间的直线连接,事实上,实际工程中,海缆敷设具有不能交叉敷设、海缆不能同沟敷设、尽量减少与海域内其他管道(输油管道、通信电缆等)的交叉以及由跨海大桥等引起的航道等诸多约束。

这些都必须在海上风电场电气系统设计中进行考虑。

② 直流技术有待进一步发展

全功率变换风力发电系统的快速发展,与大功率机组带来的重量问题,使得直流系统获得了越来越多的关注。欧洲许多项目正在对此进行研究。文献[15]提出的直流集电系统能够取消风电场内部包括风机出口与海上换流站内的变压器,从而使海上平台布局更紧凑、承重更小。文献[36-37]认为直流系统能够提供更高的运行效率、可用率以及能量密度。

但是,直流变压器与其他大功率直流产品的成本问题大大限制了直流技术的应用。虽然包含CIGRE工作组在内的许多研究单位与企业正致力于此项研究^[38],但从当前的技术水平来看,虽然柔性直流输电表现出广阔的应用前景,但是直流集电系统则需要等待相关技术的进一步发展。

5 结语

海上风电场电气系统是关系风电场经济效益

和并网性能的重要部分。为了满足不同工程条件、不同运行需求,海上风电场电气系统可有多种设计方案。虽然交流电气系统是日前海上风电场采用的主要电气接线方式,但是直流系统,尤其是直流输电被认为是今后海上风电场电气系统发展的重要方向。总而言之,海上风电场电气系统的发展就是为了寻找更经济、更可靠的,符合实际工程要求与电网并网需要的电气连接方案。

参考文献

- [1] 全球风能理事会[EB/OL]. <http://www.gwec.net/>.
- [2] 维基百科[EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power.
- [3] DICORATO M, FORTE G, PISANI M, et al. Guidelines for assessment of investment cost for offshore wind generation[J]. *Renewable Energy*, 2011(36): 2043-2051.
- [4] KUSIAK A, SONG Zhe. Design of wind farm layout for maximum wind energy capture[J]. *Renewable Energy*, 2010(35): 685-694.
- [5] ACKERMANN T. Transmission systems for offshore wind farms[J]. *IEEE Power Eng Rev*, 2002, 22(12): 23-27.
- [6] WESTWOOD D. Offshore wind assessment for Norway[EB/OL]. [2010]. <http://www.nve.no/>.
- [7] LUNDBERG S. Performance comparison of wind park configurations[R]. Chalmers, Newzeland: Chalmers University of Technology, 2003.
- [8] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [9] 文劲宇, 陈霞, 姚美齐. 适用于海上风电场并网的混合多端直流输电技术研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(2): 55-61.
WEN Jin-yu, CHEN Xia, YAO Mei-qi. Offshore wind power integration using hybrid multi-terminal HVDC technology[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(2): 55-61.
- [10] 李响, 韩民晓. 海上风电串联多端 VSC-HVDC 协调控制策略[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(5): 42-57.
LI Xiang, HAN Min-xiao. A coordinated control strategy of series multi-terminal VSC-HVDC for offshore wind farm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(5): 42-57.
- [11] 李爽, 王志新, 王国强. 海上风电柔性直流输电变流器 P-DPC 控制研究[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(2): 264-270.

- LI Shuang, WANG Zhi-xin, WANG Guo-qiang. Predictive direct power control strategy for offshore wind power VSC-HVDC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 264-270.
- [12] BRESESTI P, KLING W L, HENDRIKS R L, et al. HVDC connection of offshore wind farms to the transmission system[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 37-43.
- [13] KIRBY N M, XU Lie, LUCKETT M, et al. HVDC transmission for large offshore wind farms[J]. Power Engineering Journal, 2002, 16(3): 135-141.
- [14] ROBINSON J, JOVICIC D, JOOS G. Analysis and design of an offshore wind farm using a MV DC grid[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(4): 2164-2173.
- [15] TANG Lian-xiang, OOI B T. Protection of VSC-multi-terminal HVDC against DC fault[C] // Power Electronics Specialists Conference, 2002. PESC 02. 2002 IEEE 33rd Annual.
- [16] 东方电缆产品手册[EB/OL].
<http://www.orientcable.com/pros.asp?/pros.html>.
- [17] NEGRA N B, TODOROVIC J, ACKERMANN T. Loss evaluation of HVAC and HVDC transmission solutions for large offshore wind farms[J]. Electric Power System Research, 2006, 76(11): 916-927.
- [18] MEYER C, HOING M, PETERSON A, et al. Control and design of DC grids for offshore wind farms[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2007, 43(6): 1475-1482.
- [19] www.4coffshore.com/windfarms/substations.aspx.
- [20] YANG Jin, O'REILLY J, FLETCHER J E. Redundancy analysis of offshore wind farm collection and transmission systems[C] // SUPERGEN 2009, Nanjing, April 6-7, 2009.
- [21] ZUBIAGA M. Energy transmission and grid integration of AC offshore wind farm[M]. InTech. UK.
- [22] 建设银行授信管理部. 海上风电场经济性浅析[R]. 信贷决策参考, 2010.
- [23] 王建东, 李国杰. 海上风电场内部电气系统布局经济性对比[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 99-103.
WANG Jian-dong, LI Guo-jie. Economic comparison of different collector network for offshore wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 99-103.
- [24] 黄玲玲, 符杨, 郭晓明. 大型海上风电场电气接线方案优化研究[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 72-76.
HUANG Ling-ling, FU Yang, GUO Xiao-ming. Research on optimization of electrical connection scheme for a large offshore wind farm[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 72-76.
- [25] GONZALEZ-LONGATT F M, WALL P, REGULSKI P, et al. Optimal electric network design for a large offshore wind farm based on a modified GA approach[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1): 164-172.
- [26] ZHAO M, CHEN Z, BLAABJERG F. Optimization of electrical system for a large DC offshore wind farm by genetic algorithm[C] // Proc of NORPIE'04, June 14-16, 2004.
- [27] RIBRANT J, BERTLING L M. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 167-173.
- [28] 王建东, 李国杰. 考虑电缆故障时海上风电场电气系统开关配置方案的经济性比较与分析[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 125-128.
WANG Jian-dong, LI Guo-jie. Economic study on switchgear configuration in electrical system of offshore wind farms with cable outage[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 125-128.
- [29] 王卫昀. 海底光缆系统设计及线路余量的考虑[J]. 电信工程技术与标准化, 2006, 19(3): 42-44.
WANG Wei-jun. Margin calculation and engineering design of fiber optical submarine cable system[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2006, 19(3): 42-44.
- [30] 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, 2010, 36(21): 121-129.
FU Zhi-xin, YUAN Yue. Status and prospects on condition monitoring technologies of offshore wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 36(21): 121-129.
- [31] 黄玲玲, 符杨, 郭晓明. 海上风电场集电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 169-174.
HUANG Ling-ling, FU Yang, GUO Xiao-ming. Reliability evaluation of wind power collection system for offshore wind farm[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 169-174.
- [32] NILSSON J, BERTLING L. Maintenance management of wind power systems using condition monitoring systems-life cycle cost analysis for two case studies[J].

- IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 223-229.
- [33] 吴昊, 张焰, 刘波. 考虑风电场影响的发输电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 36-42.
WU Hao, ZHANG Yan, LIU Bo. Reliability assessment of generation and transmission systems considering wind farm effects[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 36-42.
- [34] 蒋泽甫, 谢开贵, 胡博, 等. 风力发电系统可靠性评估解析模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 52-57.
JIANG Ze-fu, XIE Kai-gui, HU Bo, et al. Wind power generation analytical model for the reliability evaluation of power systems[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 52-57.
- [35] 电气标准规范汇编[M]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
- [36] 国家电网公司企业标准. Q/GDW 2009 110 (66 kV) ~ 220 kV 智能变电站设计规范[S].
- [37] 关宏亮, 赵海翔, 王伟胜, 等. 风电机组低电压穿越功能及其应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 173-177.
GUAN Hong-liang, ZHAO Hai-xiang, WANG Wei-sheng, et al. LVRT capability of wind turbine generator and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 173-177.
- [38] ZHAN C, SMITH C, CRANE A, et al. DC transmission and distribution system for a large offshore wind farm[C] // 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, London, October 19-21, 2010.

收稿日期: 2013-08-15; 修回日期: 2013-11-09

作者简介:

黄玲玲(1982-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事海上风力发电控制与规划等方面的研究工作; E-mail: linglinghuang82@126.com

曹家麟(1948-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为信息处理及控制技术及电网规划;

符杨(1968-), 男, 通信作者, 教授, 主要从事电力系统规划、风力发电等方面的研究工作。