

大规模海上风电场并网接入方式

陈 锋, 刘连永, 董余凡
(丹阳市供电公司, 江苏 丹阳 212300)

摘 要:海上风电场以其储量丰富、风力稳定、干扰少等特点,受到越来越多的关注,是未来风力发电发展利用的大趋势。对比分析了适用于海上风电场并网的高压交流(HVAC),常规高压直流(LCC-HVDC)和柔性直流输电(HVDC-Flexible)3种并网方式,并着重探讨了柔性直流输电并网的具体方案以及适用于海上风电场的直流换流站拓扑结构。

关键词:海上风电;高压交流输电;常规高压直流输电;柔性直流输电

中图分类号:TM614

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0081-04

随着世界经济的不断发展,能源短缺和环境污染等问题日益严峻,各国都开始着手优化能源结构,大力开发可再生能源。近年来,我国也加快了构建绿色能源供应体系的步伐,其中风力发电以其巨大的潜力和相对成熟的商业化基础最为引人注目。文中介绍了适用于海上风电场并网传输解决方案的特点和适用范围,并进行了对比分析。

1 海上风电场发展状况及优势

中国风能资源十分丰富,目前已经探明的风能储量约为3226 MW,主要分布在西北、华北和东北的草原和戈壁以及东部和东南沿海及岛屿上,已经建成并网发电的风电场主要分布在新疆、广东、辽宁、内蒙、浙江等16个省区^[1,2]。东部沿海地区经济发达,能源紧缺,开发丰富的海上风能资源将有效改善能源供应情况,因此海上风电的开发前景广阔^[3-5]。

一般认为2 MW是陆上风电机组单机容量的极限值,因为此类风机机叶长度将达到60~70 m,陆上运输很困难,安装用的吊车吊装重量将超过1200~1400 t,大部分地区不具备这个条件。由于风电场的噪声、占用大量土地资源以及风电机组庞大的体积,使得陆上风电场的选址和风机的运输遭遇很大困难。而这些问题对于海上风电来说,相对比较容易解决,海上运输方便并且超过1500 t的浮吊已经比较普遍,风电的开发正向海上转移,即建设海上风电场。

与陆地风电相比,海上风电有以下优点:高风速、低风切变,由于海平面光滑、摩擦力小,因此风速较大,风速、风向的变化较小,风切变也较小,不需要很高的塔架,可降低风电机组成本;海上风湍流强度小,具有稳定的主导风向,机组承受的疲劳负荷较低,风机寿命更长;海上风电场允许单机容量更大的风机,高者可达5~10 MW^[6],由于对噪音要求较低,通过更高的转动速度及输出电压,可获取更高的能量产

出。海上风电年平均利用小时可达3000 h以上,离岸10 km的海上风速比岸上高25%^[7],海上风电场的能量收益比沿海风资源丰富地区的陆地风机高出20%~40%^[8],所以海上风机更具吸引力。

2 海上风力发电传输方案

海上风电场的容量一般较大,距离海岸5~300 km,需要通过海底电缆接入陆上的电网。并且由于自然风的随机性,预测准确度不高,风力发电的波动性较大,随着海上风电场的容量越来越大,对系统的影响也越来越明显。目前可采用的海上风电场并网方案主要是高压交流(HVAC),基于相控变流器的常规高压直流(LCC-HVDC)以及基于电压源型变流器的柔性直流输电(HVDC-Flexible),以下将对3种方案各自的特点进行比较分析^[9-11]。

2.1 HVAC 并网方式

目前海上风电场规模较小、离岸距离教近,普遍采用HVAC并网方式,如图1所示。高压交流并网方式最大优点是技术成熟、并网结构简单、成本低。

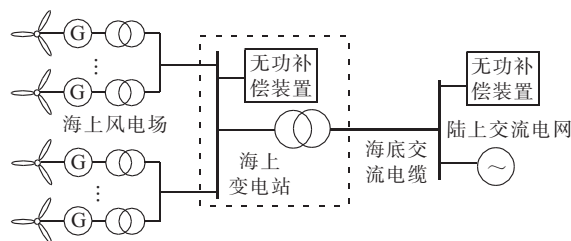


图1 高压交流并网方式

HVAC并网方案使用的是交流电缆,在传输交流电能时会产生大量容性无功损耗,传输线路的功率因素较低,降低了交流电缆的实际输电容量,并且随着输电距离的增加这种现象越严重。因此,必需在电缆两端的变电站增设大容量感性无功补偿装置,既增加输电成本,也增加海上变电站的体积,给变电站的建设带来困难。而从国内外海上风电场的规划方案来看,海上风电场的容量会越来越大,一般大中型海上风电场的装

机容量都会达到 200 MW 甚至 1000 MW 以上。同时,海上风电场的地理位置一般距负荷中心较远,其就近的接入电网主要是低压配电网,这样的输电系统 R/X 比值较大、短路容量较低,而使用 HVAC 并网方式需要接入电网的短路容量比较大,进一步制约了海上风电场的并网容量。此外,HVAC 并网方式也意味着风电场和所接入的陆上交流系统必须保持同步,无论是风电场侧,还是系统侧发生故障都会直接影响到另一侧。随着海上风电场装机容量的增大和离岸距离的增加,HVAC 并网方式的经济性和可靠性会降低,使其在远距离大容量海上风电场并网中的应用非常有限。

2.2 LCC-HVDC 并网方式

LCC-HVDC 产生于上世纪 50 年代,经过半个世纪的发展,在陆上输电系统中已经有了一定应用。因其适宜远距离输送、输电容量大、易于控制和调节,在海上风电场并网工程中应用前景乐观。

基于 LCC-HVDC 技术的海上风电场并网传输系统如图 2 所示,包括:换流变压器、无功补偿设备、交流滤波器、晶闸管换流器、直流电抗器、直流滤波器、直流电缆、辅助功率设备以及控制和保护设备。

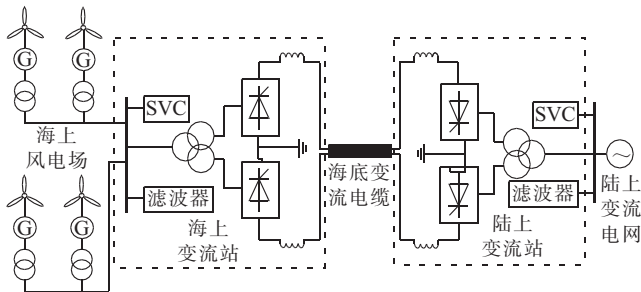


图 2 常规高压直流输电并网方式

由于 LCC-HVDC 换流站基于晶闸管器件,而晶闸管是半控型功率器件,只能控制其开通过程,无法控制其关断过程,只有当流过晶闸管的电流为零,且管两端电压在一段时间内为零或负值时,晶闸管才能可靠关断。因此 LCC-HVDC 存在如下固有缺陷^[12]:(1) 为保证晶闸管可靠触发,其整流侧的触发滞后角一般要保证 $10\sim 15^\circ$,而逆变侧的关断超前角一般为 15° 或更大些。因此 LCC-HVDC 在运行过程中,需要吸收大量的无功功率,其数值为输送有功功率的 $40\%\sim 60\%$,这样需要在整流站和逆变站装设大量的无功补偿设备,从而增加了换流站的体积,特别不利于离岸的换流站的施工和安装。(2) 晶闸管的开关频率一般都比较低,换流站运行过程中会产生大量谐波,需要在两端的换流站增设体积庞大的交流滤波装置。(3) LCC-HVDC 输电系统对所联交流系统的故障非常敏感,故障发生时交流母线电压会下降,容易导致换相失败,造成系统运行事故。

2.3 HVDC-Flexible 并网方式

HVDC-Flexible 是一种基于电力电子技术的新颖输电技术,以 IGBT、IGCT 等全控电力电子器件和 PWM 技术为核心,具有很好的性能:独立控制有功、无功功率;可连接弱交流系统或无源系统;不会增加交流系统的短路容量;变流站采用模块化设计,安装、调试简单等等。从瑞典 Gotland、丹麦 Tjaereborg 等并网风电场工程的运行经验来看,HVDC-Flexible 不仅能够减小风电场对电网稳定性、安全性和电能质量等方面的影响,而且可以提高并网风电场的输送容量和风电场的接入容量,灵活控制风电潮流。

但 HVDC-Flexible 变流站也存在开关损耗较大等问题,与 HVAC、LCC-HVDC 之间不存在绝对的优劣,需要综合考虑。在输送功率相同和可靠性指标相当条件下,虽然 HVAC 中换流站的建造费用比较昂贵,但 LCC-HVDC 只需要 1 根电缆(单极型)或 2 根电缆(双极型),HVDC-Flexible 也只需要 2 根电缆,而 HVAC 需要 3 根电缆,且直流电缆成本更低。因此当海底电缆输电距离增加到一定值,交、直流输电方式的设备总成本可以相等,这个距离就称为交直流输电等价距离,如图 3 所示^[13]。

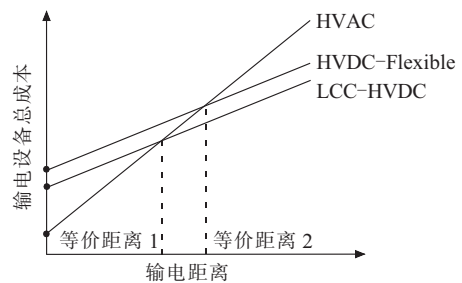


图 3 交直流输电等价距离示

从图 3 可以看出,虽然 LCC-HVDC 和 HVDC-Flexible 变流站的建设成本要高于 HVAC 变电站的,但由于敷设直流电缆的单位成本要比交流电缆的成本低。因此当输电距离达到电缆线路等价距离时,高压直流输电与高压交流输电的输电设备总成本相等,当输电距离大于等价距离时,LCC-HVDC 和 HVDC-Flexible 比 HVAC 更经济,且距离越长 LCC-HVDC 和 HVDC-Flexible 的经济性越明显。目前一般认为海底电缆线路的交直、流输电等价距离约为 90 km,并且随着变流装置价格的不断下降,等价距离必然也将不断减小。

一般海上风电场装机容量在 100 MW 内,或离岸距离在 100 km 内,HVAC 并网方式相对其他 2 种直流并网方式具有更大的优势。而在考虑了海上变流站的施工费用和安装难度的因素,海上风电场装机容量在 100~400 MW 之间时,相对于 LCC-HVDC 来说,HVDC-Flexible 在经济和技术上更优越。而当装机容量超过 400 MW 时,LCC-HVDC 占有优势。

3 海上风电场 HVDC-Flexible 并网方案

虽然 HVDC-Flexible 都是基于 VSC 换流器,但根据海上风电场电气主接线方式和 VSC 安装位置的不同,其 HVDC-Flexible 并网方案分为以下几种。

3.1 并网方案一

如图 4 所示,每台风力发电机输出的交流电经变压器升压到 10 kV 或 35 kV,由各自的 VSC 转换成直流电,再通过海底直流电缆连接到海上风电场的直流升压站,升压站内的 DC/DC 模块将公共直流母线上的直流电压提升到 ± 150 kV,然后经过海底直流电缆将海上风电场的电能输送到岸上的 VSC 换流站,经岸上 VSC 换流站变换为交流电后接入电网。

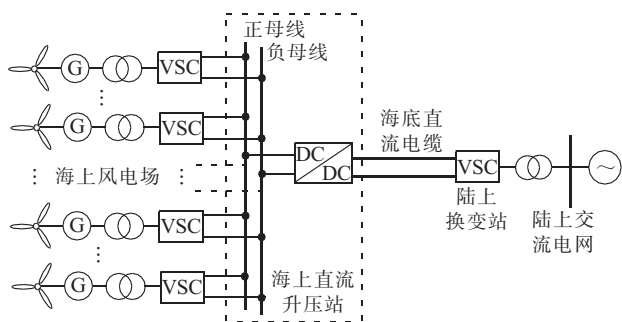


图 4 海上风电场 HVDC-Flexible 并网方案一

该方案的优点是可以通过独立的 VSC 灵活控制每台风机的有功、无功功率;每台风机可以根据本台风机的实时风速,调节机组输出交流电压的频率,使得本机组工作在理想的转速,以保证本机组功率捕获性能始终保持最优状态。其缺点是风电机组内电气结构较复杂,在机组设计时要充分考虑 VSC 的结构和安装位置,增加了风电机组设计和安装的难度;并且海上风电场的 VSC 控制系统比较复杂,如果机组侧 VSC 直流电压控制不当的话,可能会在 VSC 之间产生换流;由于要考虑单台机组 VSC 的尺寸,所以其输入输出电压等级较低,需经过 DC/DC 升压站来提升直流输电的电压等级,目前 DC/DC 升压技术主要应用在小功率低电压的开关电源领域,在大功率和高电压领域的工程实例基本没有;同时考虑每台 VSC 的功率冗余问题后,该方案需要使用的功率器件数目比较多,增加了设备成本;由于每台机组都装有 VSC,增加了维护难度。

3.2 并网方案二

如图 5 所示,将海上风电场的风机分成多组,每台风力发电机输出的交流电经变压器升压到 10 kV 或 35 kV,由各自的 VSC 转换成直流电,在每一组内的 VSC 输出电压串联起来,使得每一组的输出直流电压达到 ± 150 kV,然后将各组的输出电能并接到海上汇流站的 ± 150 kV 母线上,再经过海底直流电缆将海上风电场的电能输送到岸上的 VSC 换流站,经岸上 VSC

换流站变换为 50 Hz 交流电后接入电网^[14,15]。

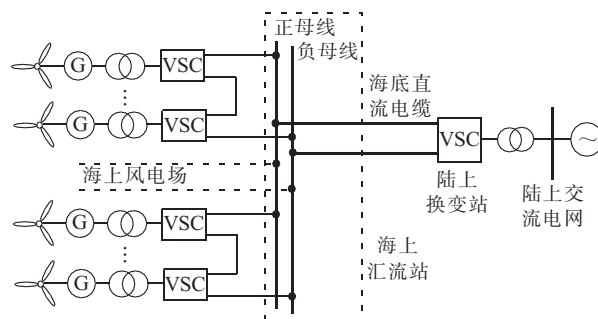


图 5 海上风电场 HVDC-Flexible 并网方案二

该方案具有方案一的优点,且相对于方案一来说,节省了 DC/DC 升压站的设计和安装,降低了并网的技术难度和成本。该方案也存在与方案一类似的缺点,由于对风电场内的 VSC 进行分组和串并联连接,使得海上风电场的内部接线比较复杂,增加了海上风电场安装和施工难度。

3.3 并网方案三

如图 6 所示,风电场内的风机划分成独立的几块区域,各区域内的所有风力发电机输出电压经变压器升压到 10 kV 或 35 kV,然后通过海底交流电缆汇接到本组的交流母线上,各组的母线是相互隔开的,海上换流站内各组 VSC 将本段母线的交流电能转化为 ± 150 kV 的直流电能,再经本组专用的海底直流电缆将直流电能传输到相应的岸上 VSC,各组岸上 VSC 再独立地将本组的直流电转化为交流电,经过变压器接入电网^[16]。

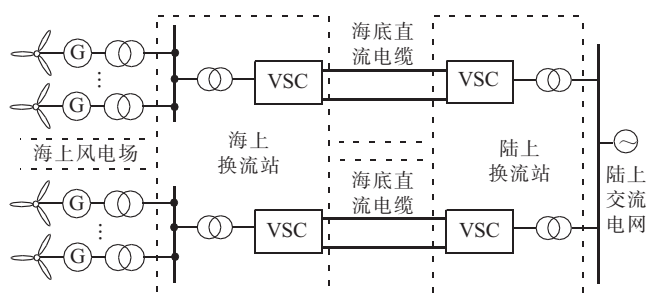


图 6 海上风电场 HVDC-Flexible 并网方案三

该方案的优点是:每片区域内的风电场只通过本组的背靠背型 HVDC-Flexible 系统就实现了并网运行,不需要装设体积庞大的 VSC 变流器,从而降低了风电机组和风电场内部主接线的设计和安装难度,同时也降低了 VSC 的控制设计和维护难度,适合于单片区域内风机容量约为 400 MW,风电场总容量超过 600 MW 的大型海上风电场。其缺点是:海上换流站内分段母线较多,要配备多套母线保护设备,增加了设备成本和维护难度;区域内所有风机都只受同一个 VSC 控制,区域内机组不能独立控制自身的有功、无功功率,所有风机只能工作在同一个转速下,无法保证区域内

每台机组功率捕获性能始终保持最优状态;使用了多套背靠背型柔性直流输电系统,增加了成本和维护难度,总的开关损耗也比较大。

3.4 并网方案四

如图7所示,风电场内所有风力发电机输出电压经变压器升压到10 kV或35 kV,然后通过海底交流电缆汇接到海上换流站的交流母线上,通过海上换流站内VSC将交流电能转化为 ± 150 kV的直流电能,再经过海底直流电缆将直流电能传输到岸上VSC,岸上VSC再将直流电转化为交流电,经过变压器接入电网^[10]。

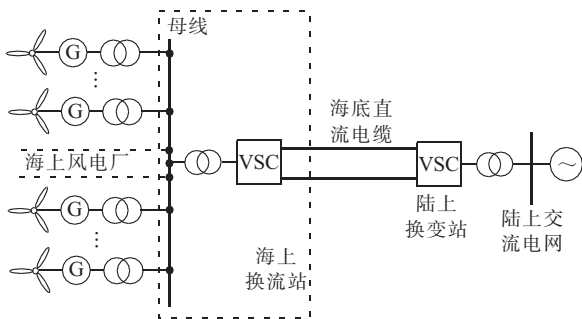


图7 海上风电场 HVDC-Flexible 并网方案四

该方案的优点是:风电场内电气主接线较简单,总的成本相对也比较低,安装和维护难度相对前面的几种方案也比较低。其缺点是:所有风机都只受同一个VSC控制,区域内机组不能独立控制自身的有功、无功功率,所有风机只能工作在同转速下,无法保证区域内每台机组功率捕获性能始终保持最优状态,这种并网方案适合于装机容量100~400 MW海上风电场。

4 结束语

海上风电以其独特的优势已开始引领风电未来的发展。世界上许多国家都十分重视海上风电的开发和利用,纷纷着手建设海上风电场,更加高效大规模地发展风电。开展对海上风电场并网方式的研究,对于解决海上风电场的关键技术问题,进一步推动风电产业的可持续发展,都有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 崔晓丹,李威,任先成,等.大规模风电接入的输电网规划研究述评[J].江苏电机工程,2012,31(6):1-5.
[2] 秦旭东.大规模风电接入对江苏电网调频影响与对策研究[J].

江苏电机工程,2013,32(4):6-9.

- [3] 林鹤云,郭玉敬,孙蓓蓓,等.海上风电的若干关键技术综述[J].东南大学学报:自然科学版,2011,41(4):882-888.
[4] 葛川,何炎平,叶宇,等.海上风电场的发展、构成何基础形式[J].中国海洋平台,2008,23(6):31-35.
[5] 黄维平,李兵兵.海上风电场基础结构设计综述[J].海洋工程,2012,30(2):150-156.
[6] 宋础,刘汉中.海上风力发电场开发现状及趋势[J].新能源,2006(2):55-58.
[7] 李晓燕,余志.海上风力发电进展[J].太阳能学报,2004,25(1):78-84.
[8] 王志新,王承民,艾芊,等.近海风电场关键技术[J].华东电力,2007,35(2):37-40.
[9] KLING W L, HENDRIKS R L, DEN BOON, J. H. Advanced Transmission Solutions for Offshore Wind Farms[C]// Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, Pittsburgh, PA, United States, 2008.
[10] BRESESTI P, KLING W L, HENDRIKS R L, et al. HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2007, 22(1):37-43.
[11] BARBERIS N N, TODOROVIC J, ACKERMANN T. Loss Evaluation of Hvac and HvdC Transmission Solutions for Large Offshore Wind Farms[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(11):916-927.
[12] 宫改花.高压直流输电系统控制策略的研究[D].太原:太原理工大学,2007.
[13] 徐科,吴超,杨晓静,等.VSC-HVDC系统风力发电结构分析与控制[J].电网技术,2009,33(4):103-108.
[14] 王志新,李响,艾芊,等.海上风电柔性直流输电及变流器技术研究[J].电力学报,2007,22(4):413-417.
[15] 王琦,陈小虎,纪延超.大型风电机组和电力系统联网及相关问题[J].现代电力,2005,22(5):23-28.
[16] 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,2009,40(10):70-74.

作者简介:

陈锋(1979),男,江苏南京人,工程师,从事供用电技术及工程管理管理工作;
刘连永(1968),男,江苏宝应人,工程师,从事供用电技术及工程管理管理工作;
董余凡(1975),女,江苏丹阳人,助理工程师,从事供用电技术工作。

Review on Integration Program of Large-scale Offshore Wind Farm

CHEN Feng, LIU Lianyong, DONG Yufan

(Dan Yang Power Supply Company, Dan Yang 212300, China)

Abstract: Offshore wind farm is seen as the future development of wind power utilization trend and attracts more and more attention for its superiority such as abundant, stable, less interference and so on. Three grid connected program of offshore wind farm, HVAC, LCC-HVDC, and HVDC-Flexible are analyzed and compared with each other. Specific programs of HVDC flexible and AC-DC converter station topology for offshore wind farm are discussed.

Key words: offshore wind; HVAC; LCC-HVDC; HVDC-Flexible