

分频输电在海上风电并网应用中的前景和挑战

王秀丽¹, 张小亮¹, 宁联辉¹, 朱卫平², 王锡凡¹

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049;

2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 通过比较3种风电并网方式, 指出了分频输电系统(FFTS)在大规模海上风电并网中的应用前景。介绍了分频海上风电系统的结构和变频器的选择, 对比表明了模块化多电平矩阵式换流器(M³C)作为新一代变频器优良性能。分析了低频环境对分频海上风电系统中关键性设备的影响, 进一步从设备角度表明分频海上风电系统的可行性和经济技术优势。最后指出分频海上风电系统中仍需解决的经济技术难题, 为进一步研究指明了方向。

关键词: 海上风电; 分频输电; 并网; 经济性

中图分类号: TM71

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)01-0015-05

随着能源枯竭以及环境污染日益严重, 世界各国越来越重视新能源的开发与利用^[1]。风力发电是新能源利用中技术最成熟、最具开发条件的形式之一, 而海上风电具有资源丰富、风能稳定、发电利用小时数高、不占用土地和适宜大规模开发以及对环境影响小等特点, 受到中国及欧美发达国家越来越多的重视。随着风力发电技术的发展, 下一代近海风电场的位置距海岸的距离有望达到300 km, 单个风电场的容量可能达到兆瓦级别, 大容量远距离海上风电将是未来海上风力发电发展的趋势。如何实现大容量风电远距离传输及并网是一个极具现实意义而又亟待解决的问题。目前受到广泛关注的风电远距离输送及并网方式主要有3种^[2]: 高压交流输电(high voltage alternating current, HVAC)、高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)以及分频输电(fractional frequency transmission system, FFTS)技术。本文通过对3种输电方式简要的对比, 指出FFTS在海上风电并网中的优势, 并介绍了分频海上风电系统的结构和换流器的选择, 以及低频环境对输电系统中关键性设备的影响。

1 3种风电并网方式的简介

HVAC采用传统的工频输电方式, 无需将风机发出的电能转换为低频或者直流电能, 这种输电方式结构简单, 成本较低, 且有着多年丰富的运行和实践经验, 在近距离小容量风电输送和并网方面有着较大的优势。由于风电是经海底电缆传输的, 海底电缆相较于普通的架空输电线路而言, 电抗降低

且电容增大, 随着输电距离及输电容量的增加, 电缆中的容性充电电流将急剧增加, 导致线路损耗增大, 线路容量的有效利用率大大降低^[3]。所以HVAC难以应用于远距离和大容量风电输送和并网。

对于中远距离风电输送及并网, 目前大多采用高压直流输电(HVDC)^[4]。采用直流输电, 避免了电缆容性充电电流的影响, 增大了电能的传输距离和容量。早期直流输电工程大多采用二电平或者三电平的电压源换流器, 但由于电平数过少, 导致谐波含量过高和开关损耗过大等问题。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)^[5]通过多个子模块的叠加, 容易实现较高的直流电压, 并且具有输出电压谐波含量低、开关损耗低、故障穿越能力强等优点。基于MMC的VSC-HVDC虽然有望成为风电并网的主流方式, 但是在VSC-HVDC海上风电并网方式中的一些固有缺陷, 降低了其应用于工程实际的经济性和可靠性。图1为VSC-HVDC海上风电并网的基本拓扑, 由于在电能传输过程中要实现从交流到直流再到交流的2次电能变换, 所以必须建造陆上和海上2个换流站。其中海上换流站的建造, 无论在技术难度还是投资成本上都远远高于陆上换流站, 并且运行维护的费用也高, 很大程度上降低了VSC-HVDC用于海上风电并网的经济性。此外, 由于直流断路器等技术难题尚未得到有效解决, 造成短期内风电直流并网只能在海上换流站和陆地换流站之间以点对点的方式进行, 从而带来可靠性较低和故障率高等一系列问题^[6]。

综合比较HVAC和HVDC的优缺点, 第三种海上风电并网方式FFTS, 为大规模海上风电并网提供

收稿日期: 2016-10-19; 修回日期: 2016-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307136)

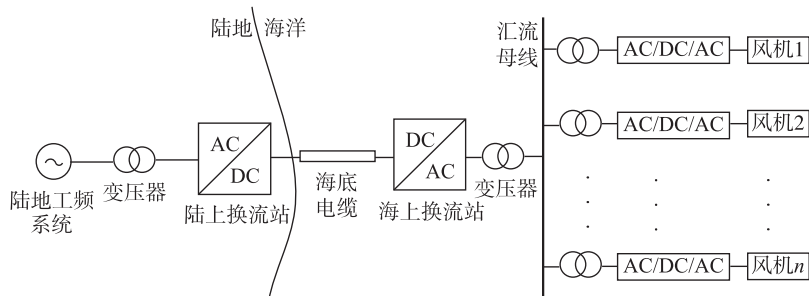


图1 海上风电经 VSC-HVDC 并网的基本拓扑

了更为经济、有效的选择。FFTS 是西安交通大学王锡凡院士于 1994 年首次针对远距离水电开发提出的一种新型输电方式^[7],二十几年来已从 FFTS 的构成形式、基础理论分析、数据模型建立、数学仿真计算及经济效益分析等方面展开研究,并进行物理实验验证^[8-12]。结果表明,与 HVAC 相比,分频海上风电系统由于频率的降低,使得海底电缆的容性充电电流显著减小,从而提高了电缆的电流容量,功率传输的距离和传输容量都大为提高。与 HVDC 相比,分频海上风电系统只需要在陆地侧建造一个换流站,这就使得换流站建设的一次性投资大为减少,降低了维护和运行费用。此外,分频海上风电系统中无需研发新的断路器可直接使用现有的交流断路器,这在一定程度上降低了风电经 FFTS 并网的技术难度。

2 分频海上风电系统

2.1 分频海上风电系统的拓扑结构

如图 2 所示,为分频海上风电系统的基本拓扑。与图 1 相比,分频海上风电系统无需海上换流站,大大降低了换流站建设的一次性投资,以及运行和维护的成本。其次,从电能发出到并网的全过程,分频海上风电系统只需进行三级换流(整流或者逆变),而 VSC-HVDC 风电系统中则需要进行四级换流,故分频海上风电系统的换流损耗更小。

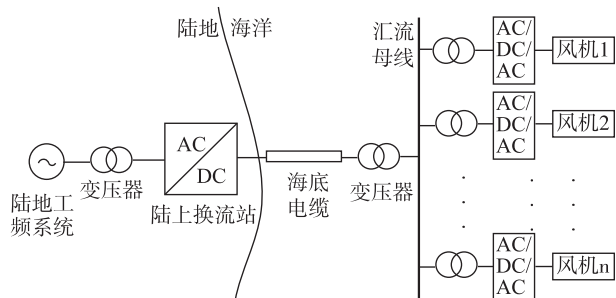


图2 海上风电经 FFTS 并网的基本拓扑

2.2 分频海上风电系统变频方式的选择

频率变换是 FFTS 中最重要的一环,故变频器

是 FFTS 中最核心的设备之一。一直以来对变频器的研究一直是 FFTS 领域的热点。用于 FFTS 中的变频器主要有 2 类:

(1) 基于晶闸管的交交变频器——其拓扑如图 3 所示。由于采用的是半控型器件晶闸管,其成本较低,可靠性高,易于实现大规模功率变换^[13]。然而其控制不如全控型器件灵活,谐波含量和波形畸变率较高,为实现较高的电能质量需加装额外的滤波和无功补偿装置,这会导致成本的升高。除此以外,基于晶闸管的交交变频器存在换相失败问题^[14],极大限制了故障穿越能力,从而限制了其在大规模风电并网中的应用。

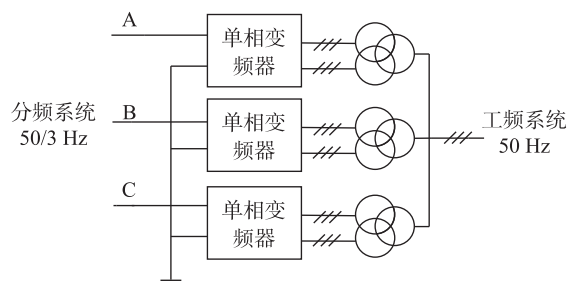
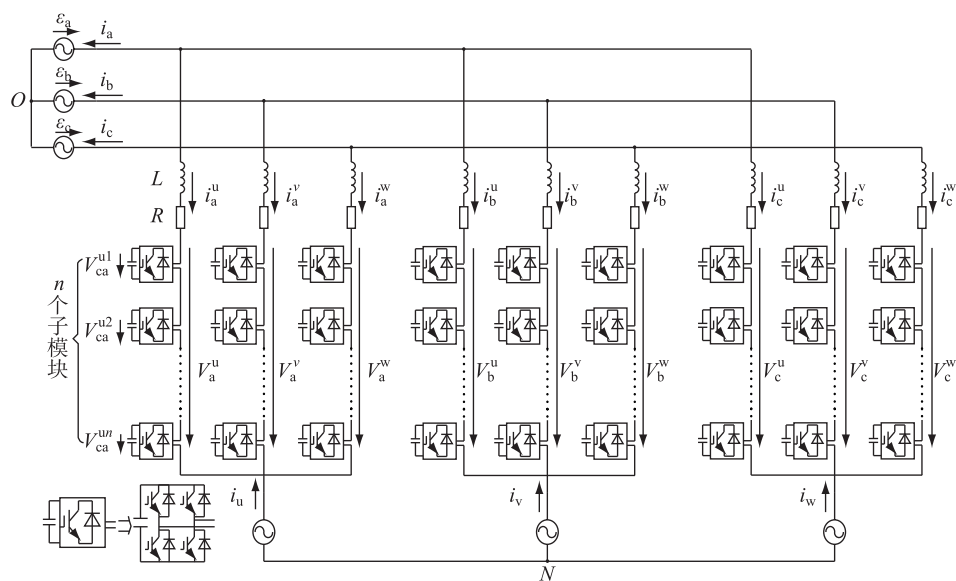


图3 交交变频器的基本拓扑

(2) 基于全控型器件的模块化多电平矩阵式换流器——模块化多电平矩阵式换流器(modular multilevel matrix converter, M^3C)^[15]自提出之日起便受到学术界的普遍关注。其基本拓扑结构如图 4 所示。 M^3C 共有 9 个桥臂,分别连接两侧的交流系统,其中左侧是工频电网,右侧可以是海上风电经 FFTS 输送的低频网络。与传统的交交变频器相比, M^3C 采用全控型的 IGBT,

能够独立控制交流侧的有功和无功功率,具有黑启动能力,更加灵活和复杂的开关模式能够降低谐波含量,从而无需或者减少额外的滤波装置,降低投资,交流侧具有较强的故障穿越能力。桥臂采用模块化的结构,使其很容易适用于高电压、大功率的场合,还能够增加两侧所联系统的稳定性,因而 M^3C 被誉为新一代的变频器。

图4 M^3C 基本拓扑

2.3 分频海上风电系统的主要电气设备

由于频率的降低,分频海上风电系统中电气设备的工作环境与 HVAC 和 VSC-HVDC 中都有所区别,其参数和性能也会有所不同,部分设备的参数需要调整甚至重新设计。

2.3.1 发电机

现代风电并网中运用最广泛的风机类型有永磁直驱风机(PMSU)和双馈异步风机(DFIU)2种,都属于变速恒频风机。其中PMSU通过1个交直交换流器连接到系统,由于直流环节的存在,起到了隔离作用,风机的工作不受低频侧的影响,可以直接使用现有的风电机组。对于DFIU,由于不存在直流的隔离作用,频率的降低会导致DFIU的体积增大,成本升高;另一方面,频率的降低也大大降低了齿轮箱变速比,甚至可以省去齿轮箱,不但降低了成本而且还提高了系统的可靠性。研究表明单个分频DFIU机组成本相较工频降低5.2%^[16]。总而言之,无论选用哪种风机,分频海上风电系统都不会增加风机的成本,甚至可能降低成本并且增加系统的可靠性。

2.3.2 变压器

分频风电系统中最大的挑战之一就是变压器。工作在低频环境下的变压器,为了避免磁饱和需要增大铁芯的截面积,使得变压器的质量和体积都增加,这在一定程度上,增加了成本;另一方面,由于频率的降低,变压器自身损耗降低,对散热的要求也降低,综合考虑两方面的因素,有研究表明变压器的成本将增加70%左右^[17]。为了便于运输,增加变压器运行的可靠性,可以考虑使用3个单相变压器来构成所需的三相变压器。

2.3.3 电缆

无论采用何种风电并网方式,海底电缆都是最关键性的设备之一。交联聚乙烯(XLPE)电缆有着低成本、低维护费用、无火灾威胁和环境友好等优势,故在交流输电系统中逐渐取代了传统的充油电缆^[18]。

研究和实践经验都表明,当这种电缆用于直流输电系统时,随着电压等级的升高,空间电荷的累积显著增加,最终导致绝缘的损坏^[19],所以直流XLPE电缆的故障率远高于交流XLPE电缆,限制了实际直流系统的电压等级。由于海底电缆故障诊断、运输和维修都十分复杂和困难,所以一旦遇上故障,整个输电系统的输送容量会减半甚至被迫完全关闭,这必然会带来极大的经济损失和能源的浪费。解决这一问题最有效的方式为采用多端结构,然而直流断路器和直流变压器的研制工作尚未解决,造成短期内风电直流并网只能在海上换流站和陆地换流站之间以点对点的方式进行,在很大程度上降低了风电经VSC-HVDC并网的经济性和可靠性。

FFTS与传统的HVAC相比,只是频率有所降低,其他方面并无本质区别,故XLPE电缆可以直接用于分频风电系统,而无需研发新的电缆。由于频率的降低,XLPE的输送容量有所下降,但文献[6]中的实际工程算例表明,一条三相的245 kV的交流XLPE电缆可以将超过600 MW的电能输送至400~500 km的距离,已经超过现有的和规划中绝大多数单个海上风电场总装机容量和输送距离。其次交流断路器和交流变压器技术已经非常成熟,交流并网很容易构建多端网络,故不存在上述直流并网的诸多问题。

3 分频海上风电所面临的挑战

根据前文所述,分频海上风电系统为大规模风电并网提供了一种全新的思路,与传统的 HVAC 和现阶段主流的 VSC-HVDC 相比具有鲜明的特点和优势。文献[20]通过具体的算例,从技术性能和经济性角度,对3种并网方式做了详细的比较,结果表明 FFTS 不仅能满足当前海上风电的并网需求,而且在大部分案例中的经济性均优于 HVDC。

分频海上风电系统在理论上具有一系列的经济技术优势,但要真正投入工程实际,经济、高效地解决大规模海上风电并网问题,尚有一些经济技术问题需要解决和优化。

3.1 海上分频风电系统的经济技术分析和规划设计

海上分频风电系统的经济技术分析和规划设计需要解决以下3个方面的技术问题。

(1) 分频海上风电系统经济区间计算。海上风电工程的建设成本很大程度上受当地水文地质条件的影响,分散性大,如何综合考虑这些因素,得出分频海上风电经济区间的一般性结论,是提高分频海上风电系统经济性需要解决的一个难点。

(2) 分频海上风电系统最佳运行频率和额定电压等级标准制定。分频系统的频率和电压可在一定范围内变化。总的来说,更低的频率可以进一步提升交流线路的输电能力,但也增加了变压器等电磁设备的成本、体积和重量。如何综合考虑海上风电和海底电网长远发展规划,制定分频海上风电系统的最佳运行频率和电压等级标准,以实现分频海上风电系统的经济最优,是研究的另一个难点。

(3) 集电系统设计与优化。当前集电系统设计方面的研究主要是针对陆地工频风电场。在这一应用背景下,发热是限制电缆传输容量的主要因素。但在海上风电场中,海洋环境成为影响电缆容量的主要因素。分频电缆、断路器的特点与工频电缆、断路器有所不同。此外,部分地区不适合施工,传统的接线方案需要变通,通用的集电系统设计及方案,可靠性评估与经济性比较方法亟待研究。

3.2 海上分频风电系统关键变频设备研发

分频海上风电系统中最关键的设备之一就是变频器。作为新一代的变频器, M^3C 具有一系列性能上的优势,但由于 M^3C 具有9个桥臂,结构复杂,这就使得分析其稳态工作时输入输出端和各桥臂电压、电流、功率等电气量的数学关系,建立其稳态数学模型变得十分困难。其次, M^3C 连接的是2个

不同频率的交流系统,这就意味着桥臂电流中将同时包含2种不同频率的分量,如何实现这2种频率分量的解耦控制是亟需解决的问题。除此之外,直流电容均压、环流等都增加了 M^3C 控制的复杂性。目前对该换流器的研究还不够深入,这是分频海上风电系统投入实际工程的另一个难点。

3.3 海上分频风电系统的控制与保护研究

分频海上风电系统通过全功率换流器与陆地电网相隔离,因此分频电网的运行与微网的孤岛模式十分相似,这给分频电网的潮流控制、保护整定与稳定性控制带来了挑战。为实现控制与保护的有效性,需进行以下方面的研究。

(1) 海上分频风电系统运行特性研究。深入分析海上多端分频电网及换流器的稳态运行特性,针对海上分频风电加入某实际系统的应用场景,研究其典型运行方式下控制器参数对系统运行特性的影响。

(2) 海上分频风电系统故障暂态特性分析和保护方法研究。通过海上分频风电接入实际电网的算例,研究换流站的故障机理,以及不同线路连接方式下线路故障机理;开展分频电网故障类别判断及故障点快速定位技术研究,给出故障点隔离、清除及恢复方法。以此为基础,开展分频风电的保护配置方案,并对所提故障暂态特性分析和保护方法的有效性进行验证。

(3) 海上分频风电系统故障穿越特性研究。建立换流器在电网电压跌落及过电压时的数学模型,深入分析电压跌落尤其是不对称跌落时负序和零序电压对变频器稳态运行的影响,设计换流器故障穿越时的控制算法。

4 结束语

本文介绍了分频海上风电系统的结构、换流器的选择和低频环境对重要设备的影响。比较了3种常用输电方式在海上风电并网中的优劣势。FFTS通过降低输电频率,极大地提高了电缆的输送容量和距离,克服了传统的 HVAC 无法通过海底电缆远距离输送风电的问题。同时低廉的换流站建设成本和运行维护费用,较高的运行可靠性使得 FFTS 相比于 HVDC 更具优势。此外,还从现阶段实际情况出发,指出了 FFTS 实际投入海上风电并网中所需解决的经济技术问题,主要包括变压器等电磁设备的成本问题、分频海上风电经济区间的划分问题、最佳运行频率和电压等级的确定问题、换流器的控制问题以及分频电网的潮流控制、保护整定和稳定性控制等问题,为进一步研究指明了方向。

目前,国内外对 FFTS 在大规模海上风电并网中应用的关注度越来越高。国内众多科研机构及高校中,以西安交通大学为代表,已经和国网公司开展了关于“分频海上风电系统研究”的项目合作。相信在不久的将来,FFTS 将能理论走向实际,彻底解决大规模海上风电并网的难题。

参考文献:

- [1] 江林. 可再生能源国际标准及现状[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(6): 81-84.
- [2] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [3] 王志新. 海上风力发电技术[M]. 北京机械工业出版社, 2013.
- [4] 陈锋, 刘连勇, 董余凡. 大规模海上风电场并网接入方式[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(3): 81-84.
- [5] MARQUARD R, LWSNICAR A. A New Modular Voltage Source Inverter Topology[C]//European Conference on Power Electronics and Applications. Toulouse, France: EPE, 2003: 17-32.
- [6] ERLICH I, SHEWAREGA F, WREDE H, et al. Low Frequency AC for Offshore Wind Power Transmission—Prospects and Challenges[C]//AC and DC Power Transmission, 11th IET International Conference, Birmingham, 2015: 1-7.
- [7] WANG XIFAN. The Fractional Frequency Transmission System [C] //IEE Japan Power & Energy. Tokyo, Japan IEE, 1994: 53-58.
- [8] WANG XIFAN, WANG XIULI. Feasibility Study of Fractional Frequency Transmission System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 962-967.
- [9] 王锡凡. 分频输电及其在风电等再生能源接入系统中的应用[J]. 动力与电气工程, 2008, 2(1): 12-14.
- [10] 宋卓彦, 王锡凡, 滕予非, 等. 变速恒频风力发电机组控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 8-17.
- [11] 宁联辉, 王锡凡, 滕予非, 等. 风力发电经分频输电接入系统的实验[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 9-16.
- [12] 王锡凡, 王秀丽, 滕予非, 等. 分频输电系统及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 1-6.
- [13] CHO Y, COKKINIDES G, MELIPOULOS A. LFAC—Transmission Systems for Remote Wind Farms Using a Three-phase, Six-pulse Cycloconverter[C]//Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA), Denver: IEEE, 2012: 1-7.
- [14] TANG Y, WYLLIE P B, YU J, et al. Offshore Low Frequency AC Transmission with Back-to-back Modular Multilevel Converter (MMC) [C] // AC and DC Power Transmission, 11th IET International Conference, Birmingham: 2015: 1-8.
- [15] YUSHI M, TOMOYA M, MICHITAKA I, et al. Modular Multi-level Matrix Converter for Low Frequency AC Transmission[C] //IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Kitakyushu, 2013: 1079-1084.
- [16] 迟方德, 王锡凡, 王秀丽. 风电经分频输电装置接入系统研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 59-63.
- [17] 滕予非. 分频风电系统特性分析[D]. 西安: 西安交通大学, 2012.
- [18] TAKEDA T, HOZUMI N, SUZUJH H, et al. Space Charge Behavior in Full-size 250 kV DC XLPE Cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13: 28-39.
- [19] WANG X, TU D, TANAKA Y, et al. Space Charge in XLPE Power Cable Under Dielectrical Stress and Heat Treatment [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(3): 467-474.
- [20] 王锡凡, 刘沈全, 宋卓彦, 等. 分频海上风电系统的技术经济分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 43-50.

作者简介:



王秀丽

王秀丽(1961—),女,河南信阳人,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统分析、规划;

张小亮(1993—),男,安徽合肥人,硕士,主要研究方向:电力系统及其新型输电方式的分析与控制;

王锡凡(1936—),男,河北安平人,中国科学院院士,教授,博士生导师,IEEE Fellow,主要研究方向:电力系统分析、规划及电力市场;

宁联辉(1979—),男,陕西西安人,副教授,主要研究方向:电力系统及其新型输电方式的分析与控制;

朱卫平(1983—),男,江苏南京人,工程师,从事配电系统及新能源接入分析工作。

Application Prospects and Challenges of Fractional Frequency Transmission System in Offshore Wind Power Integration

WANG Xiuli¹, ZHANG Xiaoliang¹, NING Lianhui¹, ZHU Weiping², WANG Xifan¹

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Through the comparison of three methods for the grid interconnection of offshore wind power, this paper pointed out the application prospects of fractional frequency transmission system (FFTS) in large-scale offshore wind power integration. Besides, this paper introduced the structure of fractional wind power system and the choice of inverter and showed the excellent performance of modular multilevel converter (M^3C) as a new generation inverter. Moreover, this paper analyzed the influence of low frequency on the critical machines used in fractional offshore wind power system, which furtherly shows the feasibility, economical advantages and technological advantages of the fractional offshore wind power system. Finally, some economical and technological problems remaining unsolved of the fractional offshore wind power system were pointed out, which indicated the direction for further study.

Key words: offshore wind power; FFTS; grid connection; economy