



Review on Engineering Practices and Future Technology Prospects of European Offshore Wind Power

Yang, Guangya

Published in:
Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems

Link to article, DOI:
[10.7500/AEPS20210427001](https://doi.org/10.7500/AEPS20210427001)

Publication date:
2021

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Yang, G. (2021). Review on Engineering Practices and Future Technology Prospects of European Offshore Wind Power. *Dianli Xitong Zidonghua/Automation of Electric Power Systems*, 45(21), 23-32.
<https://doi.org/10.7500/AEPS20210427001>

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

欧洲海上风电工程实践回顾及未来技术展望

杨光亚

(电气工程学院电力与能源中心, 丹麦技术大学, Kgs. Lyngby 2800, 丹麦)

摘要: 海上风电产业在欧洲已发展了近30年, 目前已成为欧洲最主要的可再生能源发电形式之一, 在未来可再生能源的规划中占有非常重要的地位。海上风电场在20世纪90年代初从丹麦、英国、瑞典和荷兰最早开展示范, 由最初几万千瓦的规模逐步增长到几十万千瓦, 到目前已发展到上百万千瓦。在这个产业化的过程中, 欧洲风电行业积累了很多设计、监管及运行的经验。文中针对欧洲风电场发展过程, 首先对不同发展阶段产生的一些主要技术问题进行了回顾, 然后重点讨论了电气设计中的几个主要问题, 从电气设计角度对工程实践的一些经验进行了总结, 最后对未来风电场发展及并网技术方向进行了展望。

关键词: 海上风电场; 电气系统设计; 新能源并网; 弱电网

0 引言

欧洲是世界上最早提出海上风电的概念及进行工程实践的地区之一。从产业的角度来看, 欧洲海上风电场到目前大概有30年的发展历史, 欧洲在风机设计制造、风电场设计建造及运维方面积累了很多实践经验。从最早海上风电场 Vindeby(丹麦, 1991年)装机容量5 MW, 11台450 kW风机, 离岸距离3 km, 发展到目前在建的最大的海上风电场 Hornsea 2(英国)装机容量14 GW, 165台风机, 离岸距离90 km, 经历了风电场规模由小到大、离岸距离由近到远的过程。整个发展过程可分为几个阶段, 而每个阶段都有不同的工程挑战, 由此可以看到风电场设计建造可能遇到的技术问题及工程挑战。

本文首先从历史的角度对海上风电场的发展进行了总结, 并对每个时期工程上遇到的一些主要电气问题进行了回顾。在此基础上, 本文对当前风电场设计常见的技术问题进行了讨论, 对一些电气设计技术提出了建议, 并对未来风电场的发展进行了展望。

1 欧洲海上风电场发展历史回顾

本章的时间线主要参考文献[1]中的论述, 从历史角度回顾海上风电场的发展, 并对其间遇到的主

要电气技术问题进行了回顾。

1.1 第一阶段: 萌芽期(1991—2001年)

丹麦风能产业在20世纪70年代的石油危机之后开始兴起。政府扶持海上风电场示范项目的初衷是为促进风能产业的发展及拉动出口增长。在这个时期, 世界上大部分政府和企业都不认可海上风电场的发展前景, 因而项目主要还是以政府政策拉动、公共企业牵头的形式。这一时期安装的容量很少, 业界主要面临的压力一方面是缺乏可靠的产业链, 包括风机制造及海上所需各种电气设备, 另一方面受限于风机的容量(0.5~1 MW)。风电场的规模较小(项目装机容量大都在20 MW左右), 也因此限制了海上风电场产生的社会影响和经济效益。

示范项目显示海上风电场对设备的可靠性、安装及运维的要求比设想要高, 但发电量及在线率方面却表现得很好^[2]。以 Vindeby 风电场为例, 该风电场发电量满足预期指标, 并在最初的5年里在线率超95%。此后开发的 Tunø Knob 风电场(10台0.5 MW风机, 离岸6 km)在发电量以及在线率上超出了设计预期^[2]。与陆上风电相比, 海上风电投资大, 但社会经济效益明显。1 MW装机容量的海上风电投入在2000年可以给欧盟带来4~5个工作岗位^[3], 这也使国家政策向风电产业倾斜。

丹麦在海上风电方面是起步最早的几个国家之一, 20世纪90年代已经确定规划区域并展开定点数据采集工作, 包括海洋风资源、气候、水文及海底地质等, 由此了解工程需求并带动风机设计、安装等一系列研究。比如, Vindeby 风电场所在海域的雷击

收稿日期: 2021-04-27; 修回日期: 2021-08-30。

上网日期: 2021-10-11。

英国天然气和电力市场办公室资助项目(SPT/Phoenix/16 December 2016)。

次数很多,因此带动风机避雷保护技术的发展。另外,通过海水海风腐蚀认识到离岸设备涂层、润滑、密封对使用寿命的影响。由于风机离岸远,风电场监控系统需要高度自动可靠,并采用主动维护策略。另外,风电场对海洋生态环境的影响,比如噪声对海洋生物(如海鸟或鱼类种群栖息迁移及觅食)的影响,也成为项目可行性评估的重要环境指标^[3-4]。

由于这一时期的风电场容量小,其电气设计以及并网部分所占投资比例不大,没有受到重点关注^[5]。在这一时期,丹麦风电场(Vindeby、Tuno Knob、Middelgunden)的投资费用分布主要为风机基础(占比为25%以下)和风机(占比为45%~55%),而电气投资只占总投资的10%~30%(内部投资占比为1%~6%,并网连接投资占比根据电网是否需要改造为10%~25%)^[2]。

1.2 第二阶段:上升期(2002—2011年)

2002年丹麦建设了一个有现代规模的风电场Horns Rev 1,装机容量为160 MW,离岸距离在14~20 km。风电场第1次采用了离岸变电站的电气设计,这也成为后期大型海上风电场的通用设计方案^[1]。在这个阶段,政府政策支持、项目融资开发和施工安装以及监管和市场在北海周边几个国家进一步得到完善,海上风电场进入了快速发展期。英国的Crown Estate公司在2000年、2003年和2008年进行了3轮开放式海底租赁,允许开发商在几个划定海域自由投标建设风电场,自行决定风电场大小。通过开放监管及投标的方式,英国很快超过丹麦成为世界上海上风电场最大的市场之一^[6]。

这一时期海上风电场项目规模已达100 MW以上。业界依然受到供应链薄弱问题的制约,但已有更多的供应商可以选择。这个阶段技术上的主要问题是电缆。电缆安装不善会严重影响其使用寿命且影响其连接设备安全。比如安装时过度弯曲会引起局部疲劳导致局部放电、过热而寿命缩短。丹麦Samsø风电场的岸上变压器与断路器之间的电缆由于距离短,安装时过度弯曲,导致过热最后烧坏3台主变压器中的2台^[7]。因此,电缆承重、悬垂、扭矩、弯曲在安装时均需及时和技术人员校核,在保证工期的情况下,尽量确保其在设计范围内。

另外,电缆由于其并联接地电容大会引起离岸无功过量及电压升高问题,因此离岸距离长时单纯采用风机无功控制不足以控制整个风电场内部的电压,因此需要在离岸及陆上变电站采用并联电抗进行补偿。由于电缆高电容小电阻的特性,故障后的暂态直流分量衰减缓慢,会使电流长期不过零导致断路器不断开的问题,需要在设计时进行电磁暂态

仿真确认^[8]。同样原因也会产生瞬态恢复及投电时电压过高的问题。因此,电缆特性对电网的冲击及绝缘配合开始并入标准的设计内容以进行仿真验证。

风机控制对系统的影响及电网规约在这段时期开始发展。丹麦多次出现全境风电场在风速超过25 m/s时即时减载到零的情况。针对此问题,风机中设计了功率缓降控制避免功率突降的情况。为此,在极端天气下需要以 $N-1$ 工况考虑风电场减载情况来确定备用容量。另外,故障时风电场电流对保护系统的影响也开始显现^[9]。由于离岸距离长,风机并网点短路容量下降,加上电缆阻抗特性特殊,谐波共振问题开始在某些风电场出现。发生某风电场与附近高压直流线路产生谐波共振的现象之后,谐波稳定成为研究热点^[10]。谐波分析及补偿也成为实际设计必须考虑的一环^[11-12]。

1.3 第三阶段:市场化(2012—2017年)

先行的开发商如Dong Energy(沃旭)经过之前项目已积累了很好的设计施工及运维经验。而早期风电场在设备制造及建造上的高冗余度造成成本可达每兆瓦时几百欧元。在技术可行性基本证明后,降低成本、减少政府补贴使之真正走向市场成为主题。英国在这段时期设定了2020年海上风电成本在100英镑/(MW·h)的目标^[13]。另外,早期海上风电场电能由系统运营商义务高价购买,电厂只需达到预期产能即可,而2013年后,英国引入差异成本(cost for difference),使得电厂也参与到电力市场中而政府只提供最低价格保证。其他国家比如丹麦、德国及荷兰也引入了类似的政策。

这一时期风电场规模已达500 MW以上^[14]。海上风电场的经济性和规模成正比。因此,风机的设计容量不断增加,比如更长叶片、更大容量发电机及并网逆变器。从开发商的角度考虑,风机容量的增大也意味着更少的设备及安装与维护需求,从而降低了发电成本。但风电场规模的变大使得并网稳定性成为一个不确定因素。这包括风电场自身运行稳定及并网后系统的稳定。从系统的角度考虑,风电场如果成为主要电源之一,需要在并网处提供一系列辅助服务,比如调频、调压、低压高压穿越及故障电流注入。因此,风电场尤其远海风电场一般采用静止同步补偿器(STATCOM)来满足并网要求。并网对风电场的在线率及经济性影响在这段时间成为一个主要因素。随着风电场在电力系统中所占比重不断增加,再加上老火电厂或核电厂的退出,电网强壮度减弱,风电场对系统稳定和控制上的影响成

为一个主要课题。另外,这一时期并网规约也在不断完善,英国 National Grid 公司、德国 Tennet 公司以及 ENTSO-E 联合会在这一方面处于领先地位。^[15-17]

1.4 第四阶段:大规模消纳(2018年至今)

2018年以后北海和波罗的海周边国家的海上风电场进入大规模开发时期。这段时期欧洲海上风电场的设计、施工、运行各环节已基本模块化和链条化。但整体与其他工业相比,海上风电行业依然不成熟,在很多方面还有很大的优化和提升空间。比如,由于海上的特殊环境,风电场开发对供应商的要求比较高,造成开发商选择范围相对较少,客观上减缓了成本下降的速度。另外,由于风电场离岸距离增加,远距离大型风电场采用直流传输会比目前通行的交流设计更经济,但对风电场风机控制与并网提出了新的挑战,比如,如何与高压直流线路协调控制提供系统辅助服务。另外,直流线路一般仅1条回路,送出系统的任何故障都会造成风电场全面停产,而交流线路则可采用多条回路保证一定冗余度。比如,2018年1200 MW 风电场 Hornsea 1 送出系统采用3回220 kV 交流线路,离岸距离为120 km^[14]。

大规模开发带来消纳问题。随着风电场规模的扩大、离岸距离的增加、电网短路容量的下降,风电场发出的电能将更难由电网直接全部消纳。2019年8月英国的停电事故也使得风电场对电力系统稳定性的影响更加受到电网关注^[18]。德国北部地区海上风电经常由于电网阻塞问题而受到系统限电^[19]。海上风电场作为新兴技术,其要求的自动化水平和各环节技术的成熟度(从电厂角度而非风机角度)还有很大的提升空间,其中各个技术环节都可进一步优化提高。

这一时期与风机/风电场相关的电气、建设及施工标准也已经基本建立,比如风机/风电场的电气控制、测试、数据采集及建模,包括RMS、EMT及谐波模型。IEC 61400-21及27系列标准的建立对风机/风电场的测试、测量、各模型及验证标准化具有非常重要的意义。从风机制造的角度考虑,下一步工作是对测试和测量环境进一步优化,降低产品开发周期以进一步加快新风机设计及市场化的速度。仿真方面也需要进一步标准化使得业界在电气设计、测试及验证、并网等一系列环节进一步流程化。

2 海上风电场电气设计技术环节回顾

海上风电场一般设计包括集电系统、送出系统及陆上系统,如图1所示。因受海底地况、海水深度和温度、风电场容量、并网口特性、电网特性和要求

等影响以及经济性的考虑,风电场很难有一个通用设计模板。因此,各项目都需要按照实际情况来进行优化设计。海上风电场主要的电气设计环节包括风机选址、变电站选址、设备稳态暂态容量设计、电缆优化、接地与保护系统设计、故障穿越、绝缘配合、电能质量及谐波补偿、电压无功控制、风电场控制、网侧控制以及稳定仿真。不同项目对各环节要求也不同。本文主要针对电缆优化、接地与保护系统设计、无功补偿以及谐波补偿4个方面展开叙述。

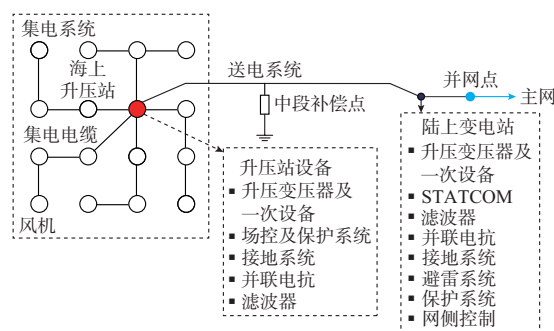


图1 海上风电场一般交流电气设计
Fig. 1 General AC electrical design for offshore wind farm

2.1 电缆优化

电缆选型优化问题是确定离岸风电场各风机之间的电气拓扑以及各线路相关的电缆型号,以经济性为唯一目标,包括设备投资费用及设计年限(20至30年)内的运行损耗(包括风机变压器及线路),并考虑不同的风机选择、常年风向风况、发电曲线、线路安装费用、海底地理以及环境要求。该问题属于典型的非线性、非凸的混合整数规划问题^[20]。其优化变量初级形式可以以图2的矩阵所示。其行列数与风机及升压变电站总数相同,每一个元素代表其中一个连接可能。因此,对于 n 台风机 m 座变电站来说,其理论上可能的连接为 $(n+m)(n+m-1)$ 种,而每个连接下还有多种可选的线型。图2所有变量为整数型变量。此外,损耗的表示有几种形式,常见的方法为引入连续变量表示每条连接下的潮流,其与该连接的下游风机数量有关,当然也有完全采用整数变量的形式^[21-22]。对于优化方法的设计,目前常用的是启发式及混合整数编程等^[20]。

对含有上百台风机的大型风电场优化来说,整体优化问题由于可能的连接数过多和线型过多会过于复杂,在实际应用中往往由于模型参数及约束条件众多而使优化求解非常困难。因此在实际工程中,该问题可做如下简化处理。

1)将风机选址、风机选型、风况风向、发电曲线分开处理并作为输入来减少建模的困难并提高结果

的鲁棒性。

2) 简化变电站选址以及送线路设计部分在建模中的比重, 比如, 通过减少可选择的连接、限定连接区域及减少线路类型选择。

3) 考虑放射形线路结构, 重点考虑风机之间的连接、电缆选择、海底地形及安装难度。

4) 适当强化运维方面及环境方面的约束。

5) 尽量降低变量引入以减少问题的复杂度。

6) 大型风电场在经济性方面可考虑备用连接, 如配电网系统, 以免在某一上游线路故障检修时影响下游风机的运行。

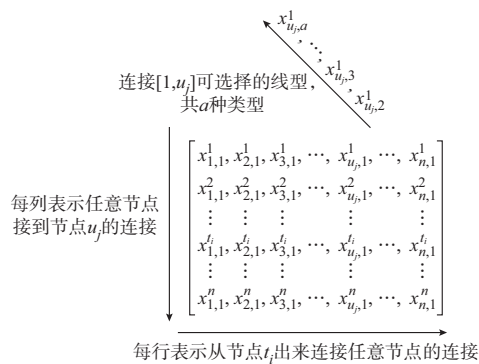


图2 电缆优化变量结构

Fig. 2 Structure of cable optimized variables

电气设计优化时的海上变电站的处理对最终设计有很大影响。一般而言, 如果安装地点不受海底地质影响, 变压器可作为一种特殊的连接节点处理在图2中表示出来。与其他连接节点, 如风机节点的不同之处在于, 变压器本身可接入的线路更多, 节点无功功率注入, 只有进线, 但最大风机接入容量受J形管数量及电缆容量限制。

本文提供一个大型海上风电场优化的思路。在进行百台风机以上并有多台变压器的风电场设计时, 其优化过程可分步实现。初始可采用简单直接的数学模型但选取严谨的优化方法(如混合整数编程)对求解域进行适当的缩小或取得一些变量的初始解。之后, 在缩小后的问题上再采用复杂数学模型并应用类似启发式的对模型适应度高的方法进行精确求解, 最后进行设计验证。

2.2 接地与保护系统设计

海上风电场接地点及接地阻抗的设计关系到设备安全、保护可靠性及风电场经济性。欧洲电网公司要求电网与电厂电气隔离, 隔离点一般通过陆上或者海上升压站变压器实现(取决于电网公司是否拥有并网运行送电系统)。该变压器电网侧为星形连接加中性点接地, 风电场侧为三角形连接。由于

风机出口变压器高压侧也为三角形连接, 风电场内部无接地点, 接地故障时无零序回路, 因此需要额外增加接地回路。一般设计是离岸或(及)陆上变电站使用三绕组变压器, 辅助绕组连接 Zig-Zag 接地变压器来承接短路电流, 或连接额外两绕组变压器来实现接地回路。接地电阻的选择则需协调接地电流大小, 考虑设备尤其电缆表层可承受的短路电流容量, 以及非故障线路的电压及故障时间, 防止设备因过压能力不足而造成绝缘破坏。

在保护方面, 由于大量使用电缆, 接地故障时电流零序容性电流成分高, 而并网准则要求风机故障时输入感性电流, 在某些情况下出现两路电流因相角相差过大而部分抵消的情况, 造成保护不动作及故障识别和方向判断问题^[23]。为提高保护的可靠性, 保护测试必不可少。另外, 也需要考虑故障外其他工况下的可靠性, 比如系统加电激励或外部短路时, 各线路的保护必须能够正确识别冲击电流或电压而不动作。同时, 保护设置需考虑与风机本体保护以及故障穿越特性上时间和定值的配合问题, 争取系统主保护或后备保护能够在风机拖网之前切除故障。另外, 上文提到的短路电流长期不过零造成断路器短路却不断开的问题也需要在设计时进行仿真验证。

另外, 由于海上风电场电缆维修困难, 精确的故障测距可有效减少维修时间, 增加风电场可用率从而提高其经济性。离岸稍远的风电场的送电系统电缆为多段连接且到陆上时可能转为架空线或分相连接, 因此, 整段阻抗特性非均匀分布, 造成常规使用的距离保护在测距方面精确度下降, 影响检修时间。因此, 除距离保护外, 其他不受安装影响的保护, 如行波保护, 也开始被关注^[24]。目前, 商用行波保护主要应用于架空线, 对海底电缆以及混合电缆的应用已有相关研究^[25-26]。该技术对测量速度和精度的要求比较高, 由于电流互感器响应频域较电压互感器宽, 目前主要采用电流信号作为主要输入。

故障时风机故障电流注入成分是需要进一步研究以及导则需要完善的地方。逆变器本身通过控制系统可在正负序上注入双向有功和无功分量, 因此可同时影响正序及负序电网的注入量^[27]。目前, 欧洲电网主要要求采用正序感性无功电流注入, 不论故障类型, 其幅值大小与正序电压的跌落值成反比。该注入法对依靠正序分量进行判断的继电器影响不大, 但对依靠负序分量进行启动或判断的继电器可能会有影响。而无负序及零序电流注入也在一定程度上造成短路电流幅值减小。从技术上来说, 注入负序感性无功电流可降低并网端口的负序电

压,但过量注入也会带来其他问题,如对附近电网及邻近电机的影响。从有功和无功功率的角度考虑,大部分电网公司都要求优先感性无功注入,而对于规模小且新能源比例高的电网,如爱尔兰电网,则要求优先有功电流注入以确保系统频率在故障时不受太大的影响。综上,高比例电力电子化系统的并网导则还有进一步完善的空间。

2.3 无功补偿

大量电缆的使用在风电场内造成很大的无功潮流,为增加电缆有功传送,必须在风电厂内部对无功功率进行补偿,尤其在远距离输电的情况下。由于风电场跨度区域大、距离远,跨风电场(尤其包括送电线路)的无功电压控制需要分区分块完成,因此需要协调各无功调压元件的控制、无功分配及电压控制点的选取和配合,避免控制器之间互相影响产生电压稳定问题,并摆脱受风机出力影响而产生电压波动。另外,应充分利用带载可变抽头变压器的自动变压作用以及风机的无功电压调节能力。一些远距离风电场,比如 Hornsea 1,送电线路中点采用无功补偿的方法来提高传输线的有功输送能力,并在线路两端采用电抗器补偿线路以及滤波器的无功功率。整个风电场的无功电压调节策略需要制定完善并在不同工况下,包括 $N-1$ 甚至 $N-k$ 情况,保证无功调节容量和电压控制策略,减少线路上的无功潮流,从而降低线损并提高有功传送能力。

一个典型的例子是在建的 Kriegers Flak 风电场。该风电场同时通过交流电连接丹麦和德国系统,整个风电场分为 2 个子风电场并连接各自变电站,其中 1 个变电站通过 80 km 的 220 kV 双回传输线连到东丹麦系统,另 1 个变电站通过 150 kV 双回传输线连接北德国系统,中间经过 Baltic 1 和 Baltic 2 两个海上风电场,总长 160 km 左右。两个变电站之间也互联。由于东丹麦及德国系统分属不同同步区,在德国侧陆上采用短高压直流变流系统。该系统跨度非常大,可控电压和无功元件众多,因此协调优化策略非常重要。最终,该系统分为丹麦侧和德国侧 2 个子区域,以 2 个风电场出口母线为分界线,各电压无功控制器件按照所在区域划分到各自区域。丹麦侧的系统通过风电场来控制离岸兼顾陆上母线电压,陆上采用可变电抗器控制并网点与系统的无功交换水平。而德国侧则用最优化潮流优化来确定各电压控制器设定值及无功补偿量^[28]。未来随着海上风电场规模的增大,离岸电网建设以及电转气设备的使用,无功电压协调控制及稳定问题会更加突出。

2.4 谐波补偿

风机在不同频率下的阻抗特性由于控制回路不同频域特性而不同。在某些频率区域内,单个或多个风机的阻抗在连接处与系统背景阻抗发生谐振效应,在存在谐波源的情况下造成电压谐波分量放大进而引起单台或多台风机无法并网运行。比如,某英国风电场设计时发现并网点系统背景 x 次谐波电压比例初始为 2%,而风电场并网后该谐波分量增至 12%,不满足电网电能质量要求^[10]。因此,在实际设计时,电网公司须提供并网点不同工况下的系统背景谐波以及谐波阻抗范围,风电场开发商因此根据各主要设备的频域模型进行谐波分析,确定谐波补偿容量。主要考虑的设备包括风机、电缆、变压器及主动控制设备如静止同步补偿器等。另外,谐波补偿不应仅仅考虑风电场完全在线的情况,还应包括风电场在不同运行方式下的阻抗情况,从而比较精确地确定主要谐波频段并以最差情况来进行滤波器容量的设计。谐波问题一方面可以通过改善风机逆变器控制回路,比如增设滤波回路来改变风机阻抗特性。更普遍的做法则是设计滤波器并保证足够的设计裕度避免由于滤波器本身检修或者故障而使风电场因缺乏滤波容量出现减载的情况。

伴随谐波问题的是风电场并网的稳定性问题。不同于传统同步电机引起的稳定问题,风电场的稳定性问题是风电场中的一个或多个控制器(包括逆变器控制、机体控制以及场控)与系统在次同步或超同步频率上发生谐振,造成电压振荡,引起功率振荡最终触发保护引起风电场脱网。造成这种现象的主要原因是系统短路容量下降以及逆变器控制器。风电场并网稳定性问题已引起很多关注并有很多论述,且该问题并不限于海上风电场,因此本文不再展开描述。

3 海上风电场并网技术发展

海上风电场发展到现在规模,并网的重要性已经非常突出。风机及风电场的并网导则已发展到相对完善的阶段,如 IEC 61400-21/27 标准,其中涵盖建模、测试、测量及各种控制功能如频率响应、无功电压运行范围、故障穿越、电能质量、故障恢复等。对离岸一定距离以上的海上风电场而言,无法直接通过风机控制器实现并网导则及电网的要求。因此,必须在并网点加装主动控制设备以满足并网要求,如 STATCOM。另外,稳定的并网点电压对风电场稳定运行也非常重要。而在短路比较小的情况下,不仅风电场,STATCOM 自身的运行稳定也会受到一定影响。因此,须加装其他设备(如同步调相

机)来改善并网点电压阻抗特性。

3.1 同步调相机

当新能源并到弱电网时,同步调相机在稳定性方面的作用在多个电网中已得到很好的验证,可很好地提高保护方面的可靠性^[29-33]。2013—2014年,丹麦电力公司在电网中加装了3台大容量同步调相机(Bjæverskov 2013年、Herslev 2014年、Fraugde 2014年)以提高系统短路容量及电压稳定。同步调相机提供的短路容量在系统稳态运行时可提高电压稳定性,而其同步机的特性可增强系统惯性并在系统动态时提高阻尼^[34-35]。在风电场规模增加且并网点电网强度减弱的情况下,采用调相机为目前唯一成熟可行的解决方案。但由于同步相机会增加海上风电场系统运维的复杂程度,且由于其运行时的损耗(1%~2%),因此,其应用范围在可见的将来将主要限于电网非常弱(如短路比长期小于3)的情况。

混合同步调相机的概念首先是由苏格兰电网领导的Phoenix项目中被提出并进行示范,其设计将STATCOM和同步调相机两种设备结合在一起,并在各自控制器的基础上设计统一控制器来实现各种工况下的协调控制以提供给系统最优的辅助服务^[36]。其设计如图3所示。混合补偿可以实现单种设备无法提供的特性,且一般而言,单一补偿设备在一定的容量之上对系统的边际成本效益比会降低。因此,将同步机与电力电子技术结合可提供多种辅助服务且提高了并网点的电压稳定,对长距离海上风电场接入电网会有很好的效果。其缺点是调相机额外的投资及较大的运行损耗。

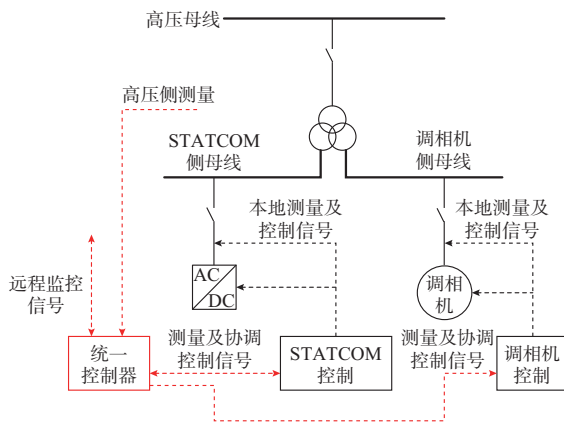


图3 混合同步调相机设计
Fig. 3 Design of hybrid synchronous condenser

除上述设计之外,混合调相机也可采用电池与调相机的组合,或与飞轮的组合,从而可以提供更多有功功率及惯性的控制^[37-38]。采用这类混合调相机

不仅可以实现海上风电场的并网稳定性,而且可以更可靠地提供调峰调频以及黑启动等辅助服务^[39]。

3.2 构网型变流器

近年来,构网型变流器(GFC)越来越成为风电界关注的热点,并被认为是未来实现大规模电力电子并网的关键技术之一^[40-41]。构网型变流器的控制主要有2条实现途径:一是虚拟同步机,即通过改变外层有功/无功控制使逆变器实现类似于同步机惯性及电压特性^[42];二是通过内层电流控制实现虚拟阻抗及类似戴维南电压源的特性^[43]。第1条路径比较直观,但参数设置复杂;而第2条路径不依赖于锁相环,响应速度快,但无严格的功率控制。GFC如果实现,可使系统稳定运行无须依赖大型同步机在线,使得海上风电场运行不受系统侧的运行方式影响,进而降低其并网成本及电网对系统短路容量的投资。

图4所示为一种完全无内层电流控制的电压源实现方法。此种控制可在较宽的频域范围内(5~1 000 Hz)实现戴维南电压源特性且响应速度快。其无功控制与变流器出口电压d轴分量(v_{vsc}^d)相关,但出口电压考虑虚拟电阻 Z_{virt} 以模拟电压源内部压降。 Z_{virt}^{trans} 为实现同步机在暂态过程中的阻抗特性。有功控制则与出口电压的相位相关。对该控制的详细分析和变量解释可见文献^[43]。

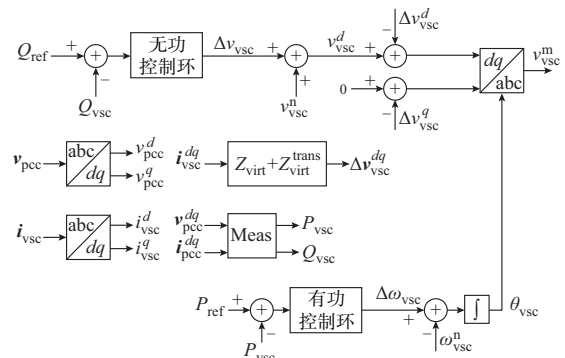


图4 GFC无内层电流控制实现方法
Fig. 4 Realization method of GFC without inner layer current control

4 未来风电场发展趋势及技术展望

随着浅海近海优质风资源区域的开发殆尽,未来的风电场将向远海深海发展。这与技术进步的方向也是相吻合的。比如,从欧洲海上风电的发展历史来看,随着离岸距离的增加,海水深度也在不断增加^[44]。从经济性上来说,深海远海的风资源要比近海更加丰富,但是对设备制造与整体设计的可靠性以及运维的要求会更高。目前,虽然风机海底基础

的设计已有很多方案及示范工程,但最成熟的商用技术依然是基于单桩的,包括目前最大的 Hornsea 1 和 Hornsea 2 风电场。欧洲目前仅有两个适合深海的浮动式风电场示范工程,其中一个是在苏格兰地区的 Hywind 风电场。Hywind 浮动式风电场目前已运行多年且无太大可靠性问题。但 Hywind 风电场离岸距离较近,对远海深海风电场来说,其海况比近海更为恶劣。目前短期的应用是采用近海浮动式或者浮动与固定安装结合的基础形式来进行技术验证。对于深海风电场来说,离岸距离往往更远,现阶段的技术挑战在于研发用于精细模拟深海气候及水文环境的软件及模型,以此改进当前风机的一些设计使其能适用于浮动基础上的运行,设计风机及变电站浮动基础及联合控制以保证结构稳定。另外,浮动式技术的发展也推动风机与波浪能的结合。目前示范的技术是在浮动式风机的水下基础上加装波浪能装置从而实现更高的效率。

对于深海远海能源输送而言,目前的技术思路是建设大规模离岸电网。比如,丹麦政府在 2021 年正式通过议案支持兴建 2 个离岸能源基地的计划。其中一个是在北海修建一个人工岛,用来连接周围在开发及将要规划的离岸风电场及周边国家。另一个是在波罗的海的 Bornholm 岛修建另一个能源基地来开发附近海域的风资源并连接瑞典、波兰、德国等附近国家。两个基地长期目标是连接 15 GW 的海上风资源。离岸电网短路容量较低,其可靠性需要在进一步完善风机及风电场的并网导则的基础上建设多技术联合测试平台加以验证。

从并网的角度,对于深海远海风电场来说,如果采用交流传输方式,所需的电压等级需要更高,对电缆绝缘的要求也相应提高。对于深海风电场还需研发适合深海使用的高压电缆及悬浮技术。长距离传输带来的另一个问题是风机/风电场与系统在弱电气连接的情况下的同步稳定性问题。这个问题可以采用离岸直流传输电网来解决。但大型风电场与直流线路连接的连续稳定性,以及直流线路如何配合系统启动风机提供辅助服务,目前都缺乏足够的工程经验及规范。

目前有潜力解决大型风电场并网问题的一种方法是采用 GFC 来控制风机网侧逆变器。这一技术已有很多研究考虑,且工业界也有初步的示范项目。从风机的角度,该技术目前面临的瓶颈是如何将网侧逆变器的控制特性与后端机械及能量转换部分结合起来。GFC 控制可以一定程度上模仿传统电机的惯性及电压源特性,但受限于逆变器过流能

力。同时,由于直流侧电容器容量很小,无法在动态时提供足够的能量,需要结合后端传动系统包括控制电机及叶片来提供后续能量,尤其是在电网波动大、动态持续较长时间的情况下。但后端传动系统的响应速度远不及前端逆变器控制。而调动后端传动系统对电网进行响应也会影响风机整体包括塔及电机的使用寿命,具体影响仍需要更多的示范项目及运行经验来进行评估和验证。另外,这方面风机的测试标准也需要进一步完善。

另一个解决并网问题的方法是增加储能装置。储能可以加在逆变器直流侧,从而解决风机电容器储能不足的问题,但机舱控制及设计的复杂度会增加,成本也会提高并增加了机舱的重量。目前,虽然类似的系统在太阳能逆变器中已有市场化应用,但这一技术还未有制造商采用。从提高风电场并网稳定性上来说,储能也可以加设在并网口并采用构网型控制来提高并网点的稳定性。这方面面临的主要挑战还是储能的经济性和可靠性。另外,结合同步调相机来提高短路容量也是一种可行的方案,但经济性会降低。除与风电场结合,辅助设备还可以同时提供给系统所需辅助服务,如黑启动、调频调压、振荡阻尼、短路容量等,整体经济性会提高。在英国近年开始的 Stability Path Finder 项目采用了此类方案^[45]。

在消纳方面,海上风电可与能源转换结合,比如通过电转气或电转热,将电能转为其他易于传输或存储的能源载体。在深海远海的风电场可采用大型电转气设备,将能源转化成氢气后压缩或转化成天然气后通过已有的海底油气网来实现传输。该技术目前已有示范项目。如在 North2 项目中^[46],海上风电到岸之后连接电解水厂,产出的氢气通过天然气管传输。其他类似项目有英国的 H100 Fife^[47]和丹麦的 H2RES^[48]等。另外,欧洲的北海地区由于风电资源丰富,长期计划安装容量达 20 TW。各个风电场将由多端直流线路连接,辅以离岸能源基地来增强互联。风机制造商也在积极研发新型风机,如风机加设电转气设备,使得风机输出氢气而非电力。但是,电转气可能长期会受限于其较低的转化率而面临其他技术的挑战。

5 结语

本文对欧洲海上风电场的发展历史进行了简要回顾。通过技术以及经济和政策上的演化,可以看出其发展从政策引领开始,然后通过一系列由小到大的工程项目,经历了技术上不断发现问题并解决

问题、经济上不断降低成本的过程。在这个过程中也为学术创新提出各种机会。很多国家政府已经将海上风电场作为新能源发展重点,项目数量处在井喷状态。但海上风电依然为一个新兴产业,从设备制造、供应链、设计优化、工程创新等方面还有很大的提升空间。近年来,大型海上风电工程项目面临的挑战是如何提高经济性、降低发电成本,以及电网的稳定性和可靠性。长期而言,海上风电场面临的真正挑战在于如何通过新的设计和应用使其像传统火电厂一样真正成为电网及能源系统中可靠的一环。

参 考 文 献

- [1] Making green energy affordable: how the offshore wind energy industry matured and what we can learn from it[EB/OL]. [2021-04-25]. <https://orsted.com/en/about-us/whitepapers/making-green-energy-affordable/1991-to-2001-the-first-offshore-wind-farms>.
- [2] BARTHELMIE R J, PRYOR S. A review of the economics of offshore wind farms [J]. *Wind Engineering*, 2001, 25 (4) : 203-213.
- [3] HENDERSON A R, MORGAN C, SMITH B, et al. Offshore wind energy in Europe—a review of the state-of-the-art [J]. *Wind Energy*, 2003, 6(1): 35-52.
- [4] BARTHELMIE R J. A brief review of offshore wind energy activity in the 1990's[J]. *Wind Energy*, 1998, 22(6): 265-273.
- [5] HALLIDAY J A. Offshore wind energy—a review of some current research and development projects [J]. *Wind Engineering*, 2001, 25(3): 149-160.
- [6] The Crown Estate. Playing our part in the growth of UK offshore wind[EB/OL]. [2021-04-25]. <https://www.thecrownestate.co.uk/media/3347/4043-tce-role-in-uk-offshore-wind-final.pdf>.
- [7] BJERREGAARD H, GRENAE E, HERMANSEN S, et al. Samsø offshore wind park: 2 years status [C]// Copenhagen Offshore Wind, October 26-28, 2005, Copenhagen, Denmark.
- [8] DA SILVA F F, BAK C L, GUDMUNSDOTTIR U S, et al. Methods to minimize zero-missing phenomenon [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(4): 2923-2930.
- [9] VALENTINI M, AKHMATOV V, THISTED J. Fault current contribution from VSC-based wind turbines to the grid [EB/OL]. [2021-04-26]. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/fault-current-contribution-from-vsc-based-wind-turbines-to-the-gr>.
- [10] HERNANDEZ MANCHOLA A J, WIJESINGHE S, SHAFIU A. Harmonic amplification of the 576 MW Gwynt-y-Môr offshore wind power plant [C]// the 11th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as Well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, November, 2012, Lisbon, Portugal.
- [11] KOCEWIAK Ł H, ÁLVAREZ C, MUSZYŃSKI P, CASSOLI J, et al. Wind turbine harmonic model and its application—overview, status and outline of the new IEC technical report [C]// the 14th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as Transmission Networks for Offshore Wind Farms, October 20-22, 2015, Brussels, Belgium.
- [12] IEC TR 61400-21-3: 2019 wind energy generation systems: Part 21-3 measurement and assessment of electrical characteristics—wind turbine harmonic model and its application [EB/OL]. [2021-04-02]. <https://webstore.iec.ch/publication/63755>.
- [13] The Crown Estate. Offshore wind cost reduction pathways study [EB/OL]. [2021-04-02]. <https://www.thecrownestate.co.uk/media/1770/ei-offshore-wind-cost-reduction-pathways-study.pdf>.
- [14] Our offshore wind farms[EB/OL]. [2021-04-26]. <https://orsted.com/en/our-business/offshore-wind/our-offshore-wind-farms>.
- [15] National Grid ESO. Grid code documents[EB/OL]. [2021-04-26]. <https://www.nationalgrideso.com/industry-information/codes/grid-code/code-documents>.
- [16] Tennet. Grid connection regulations [EB/OL]. [2021-04-26]. <https://www.tennet.eu/electricity-market/german-customers/grid-customers/grid-connection-regulations/>.
- [17] Requirements for generators[EB/OL]. [2021-04-26]. https://www.entsoe.eu/network_codes/rfg/.
- [18] National Grid ESO. Information about the 9 August power cut and the ESO [EB/OL]. [2021-04-26]. <https://www.nationalgrideso.com/information-about-great-britains-energy-system-and-electricity-system-operator-eso>.
- [19] SCHERMEYER H, VERGARA C, FICHTNER W. Renewable energy curtailment: a case study on today's and tomorrow's congestion management [J]. *Energy Policy*, 2018, 112: 427-436.
- [20] HOU P, ZHU J S, MA K C, et al. A review of offshore wind farm layout optimization and electrical system design methods [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, 7(5): 975-986.
- [21] FISCHETTI M. Mathematical programming models and algorithms for offshore wind park design [D]. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, 2017.
- [22] LINDAHL M, BAGGER N, STIDSEN T, et al. OptiArray from DONG Energy: an automated decision support tool for the design of the collection grid in large offshore wind power plants [C]// the 12th Wind Integration Workshop, October, 2013, London, UK.
- [23] TSYLIN A, KRUSE-NIELSEN R, YANG G Y, et al. Influence of collection network parameters on performance of distance protection directional elements in offshore wind farms [C]// 15th International Conference on Developments in Power System Protection, March 9-12, 2020, Liverpool, UK.
- [24] ENTSO-E. Use of travelling waves principle in protection systems and related automations [EB/OL]. [2021-04-26]. https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/USE_OF_TRAVELLING_WAVES_PRINCIPLE_

- IN_PROTECTION_SYSTEMS_AND_RELATED_AUTOMATIONS.pdf.
- [25] ZHANG K, ZHU Y L, LIU X C. A fault locating method for multi-branch hybrid transmission lines in wind farm based on redundancy parameter estimation[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, 7(5): 1033-1043.
- [26] HE L P, WANG Z, LIU H S, et al. A double terminal traveling wave ranging method of overhead line—submarine cable hybrid line [C]// the 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29-November 1, 2017, Beijing, China.
- [27] JIA J D, YANG G Y, NIELSEN A H. A review on grid-connected converter control for short-circuit power provision under grid unbalanced faults[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(2): 649-661.
- [28] AKHMATOV V, BENTZON SØRENSEN T, MARTEN A, et al. Kriegers Flak combined grid solution—principles of voltage and reactive power control for HVAC/HVDC meshed offshore grids [C]// the 17th Wind Integration Workshop; International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as Well as on Transmission Networks for Offshore wind Power Plants, October, 2018, Stockholm, Sweden.
- [29] JIA J D, YANG G Y, NIELSEN A H, et al. Impact of VSC control strategies and incorporation of synchronous condensers on distance protection under unbalanced faults [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(2): 1108-1118.
- [30] JIA J D, YANG G Y, NIELSEN A H, et al. Investigation on the combined effect of VSC-based sources and synchronous condensers under grid unbalanced faults[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(5): 1898-1908.
- [31] NGUYEN H T, GUERRIERO C, YANG G Y, et al. Talega SynCon—power grid support for renewable-based systems [C]// 2019 SoutheastCon, April 11-14, 2019, Huntsville, USA.
- [32] REHMAN E, MILLER M G, SCHMALL J, et al. Stability assessment of high penetration of inverter-based generation in the ERCOT grid[C]// 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 4-8, 2019, Atlanta, USA.
- [33] SCAPP. Synchronous condenser applications in low inertia systems[EB/OL]. [2021-04-26]. <http://www.scapp.dk/>.
- [34] MARRAZI E, YANG G Y, WEINREICH-JENSEN P. Allocation of synchronous condensers for restoration of system short-circuit power[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, 6(1): 17-26.
- [35] NGUYEN H T, YANG G Y, NIELSEN A H, et al. Frequency stability improvement of low inertia systems using synchronous condensers [C]// 2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, November 6-9, 2016, Sydney, Australia.
- [36] Phoenix. Phoenix—System security and synchronous compensators [EB/OL]. [2021-04-02]. <https://www.ofgem.gov.uk/network-regulation-riio-model/network-innovation/electricity-network-innovation-competition/scottish-power-transmission-limited>.
- [37] Uniper appoints Siemens Energy to deliver grid stability technology at UK power station sites[EB/OL]. [2021-04-02]. <https://www.uniper.energy/news/uniper-appoints-siemens-energy-to-deliver-grid-stability-technology-at-uk-power-station-sites>.
- [38] ABB. ABB synchronous condenser solutions[EB/OL]. [2021-04-02]. <https://new.abb.com/motors-generators/synchronous-condensers>.
- [39] PAGNAM D, KOCEWIAK Ł H, HJERRILD J, et al. Overview of black start provision by offshore wind farms[C]// the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 18-21, 2020, Singapore.
- [40] ENTSO-E. Grid-forming capabilities: towards system level integration[EB/OL]. [2021-04-26]. https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/RDC%20documents/210331_Grid%20Forming%20Capabilities.pdf.
- [41] H2020 Migrate. The massive integration of power electronic devices[EB/OL]. [2021-04-05]. <https://www.h2020-migrate.eu/>.
- [42] CHEN M, ZHOU D, BLAABJERG F. Modelling, implementation, and assessment of virtual synchronous generator in power systems [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 8(3): 399-411.
- [43] KKUNI K V, MOHAN S, YANG G, et al. Comparative assessment of typical control realizations of grid forming converters based on their voltage source behaviour [EB/OL]. [2021-04-03]. <http://arxiv.org/abs/2106.10048>.
- [44] ARAPOGIANNI A, GENACHTE B. The next step for offshore wind energy[EB/OL]. [2021-04-02]. https://www.m.cire.pl/pliki/2/Deep_Water.pdf.
- [45] National Grid ESO. National Grid ESO launch stability pathfinder phase one [EB/OL]. [2021-04-26]. <https://www.nationalgrideso.com/news/national-grid-eso-launch-stability-pathfinder-phase-one>.
- [46] North2. Kickstarting the green hydrogen economy [EB/OL]. [2021-04-24]. <https://www.north2.eu/en/>.
- [47] SGN. H100 Fife: future of gas [EB/OL]. [2021-04-24]. <https://sgn.co.uk/H100Fife>.
- [48] EUDP. H2RES—demonstration af bæredygtig brintproduktion til vejtransport baseret på havvind [EB/OL]. [2021-04-23]. https://energiforskning.dk/da/projects/detail?program=7&teknologi=64&field_bevillingsaar_value=2019&start=&slut=&field_status_value=ongoing&keyword=&page=1.

杨光亚(1981—),男,博士,高级研究员,主要研究方向:海上风电、电力系统稳定与控制、信息物理能源系统。E-mail: gyy@elektro.dtu.dk

(编辑 鲁尔姣)

Review on Engineering Practices and Future Technology Prospects of European Offshore Wind Power

YANG Guangya

(Center for Electric Power and Energy, Department of Electrical Engineering,
Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby 2800, Denmark)

Abstract: Offshore wind power has been developed in Europe for nearly 30 years. Nowadays, it has been developed into one of the most important sources of renewable energy generation, and occupies strategical importance in future renewable energy planning and adoption. Offshore wind farms start their journey in several European countries including Denmark, Britain, and the Netherlands in the early 1990s from a series of demonstration projects. From the initial size of plants of a few megawatts, the size gradually increases to hundreds of megawatts and to gigawatts nowadays. In this process, European wind power industry has accumulated vast experience in electric design, monitoring, operation and maintenance. In view of the development process of European wind farms, this paper starts from reviewing some of the main technical problems arising from different stages of the development. After that, it focus on several major issues in electrical design, and summarizes some experience in engineering practice from the perspective of electrical design. Finally, the paper reviews a few technical trends that can impact on the future development and integration of offshore wind power.

This work is supported by Phoenix Project led by Scottish Power and Energy Networks (No. SPT/Phoenix/16 December 2016).

Key words: offshore wind farm; electrical system design; integration of renewable energy; weak grid

