

海上风电场发展现状及并网保护的关键技术分析

文/丁志远¹ 陈焕栩¹ 傅琪雯¹ 郭洋¹ 丁杰¹ 吕俊超²

1. 国网江苏省电力有限公司常州供电分公司; 2. 国网江苏省电力有限公司淮安供电分公司

调研了目前海上风电场的发展现状，分析了不同海上风电场电力送出方式的优劣，同时聚焦并网保护的关键技术，梳理了并网系统送出线保护技术的发展现状和趋势。

我国近海风能资源主要集中在东南沿海及其附近岛屿，海岸线长约18 000 km，岛屿6 000余座，全年风速不小于6 m/s的时长达4 000 h，开发潜力巨大。近海海上风电开发对于填补我国东南地区电力负荷中心供能缺口，推动东南沿海省份的能源低碳化转型具有重要的意义。本文回顾了海上风电产业的发展历程，总结了国内现有海上风电工程的现状，聚焦海上风电并网技术，分析了风电并网送出线路保护的关键点，展望安全并网技术的发展方向。

海上风电场发展现状

1. 国外发展及现状

海上风电场产业起源于欧洲。1990年，第一台海上风电机组的样机在瑞典近海安装试运行，机组离岸距离为350 m，单机容量为220 kW。1991年，第一座规模化海上风电场在丹麦的洛兰岛建成，包含11台450 kW的风电机组，离岸距离为3 km，可满足约3 000户居民的供电需求。2000年，兆瓦级风电机组的建设和试验在海上开展，所带来的经济价值进一步推动了海上风电项目的商业化应用。2002年，丹麦在北海海域建成了世界上第一座现代化规模的海上风电场，共安装2 MW风电机组80台，装机容量达160 MW，离岸距离为20 km左右；

该项目首次采用了离岸变电站设计，为风电场送出技术奠定了基础。随后，受益于国内宽松、自由的政策，英国的海上风电场产业快速跟进，并很快超过丹麦成为世界上海上风电场最大的市场。这一时期海上风电场项目规模达到100 MW以上。

规模化风电场技术的可行性被基本证明后，降低成本、减少政府补贴从而真正走向市场成为主题。2012年以后，英国、丹麦、德国及荷兰陆续推出了促进风电商业化并网的政策。由于海上风电场的经济性与规模成正比，这一时期风电场规模已达500 MW以上。2018年以后，欧洲的海上风电进入大规模开发时期。海上风电场的容量不断增大，迈入吉瓦规模，同时离岸距离更远，风电并网送出方式从交流转变为直流。欧洲海上风电的发展历程如图1所示。

2. 国内发展现状

风电、光伏等清洁能源的大规模开发和

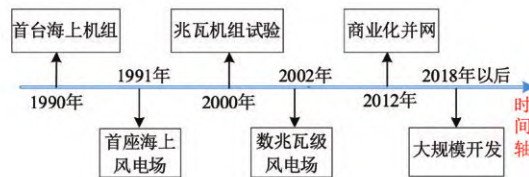


图1 欧洲海上风电的发展历程

利用是我国能源转型、实现“双碳”目标的重要措施。根据统计数据,截至2020年年末,全国风电累计装机容量2.81亿kW,其中陆上风电累计装机容量2.71亿kW,海上风电累计装机容量约900万kW。由上述数据可知,相比于开发程度较高的陆地风电场,海上风电场仍处于起步阶段,具备巨大的可挖掘潜能。由于我国陆上可再生能源资源潜力与负荷需求逆向分布,东南沿海省份的电力需求占全国的70%以上,而陆上大量优质风光资源分布在西北内陆。因此开发东南沿海及其附近岛屿的近海风能,可直接推动东南沿海省份的电力低碳化,且避免了能源长距离输送的问题。

2010年,我国第一个国家海上风电示范项目——上海东海大桥风电场建成,装机规模为34台机组共10.2万kW,离岸距离为10 km左右,是我国海上风电产业起步的重要标志。2011年,江苏如东100 MW海上(潮间带)示范风电场项目投产发电,该工程的风能资源和建设条件在江苏乃至全国的潮间带风电场中均有较强的代表性,为我国近海风电场建设积累了宝贵经验,起到良好的示范作用。近年来,在丰富的技术储备、完善的产业链结构、配套的政策和投资加持下,我国海上风电进入了快速、规模化的发展阶段。截至2020年6月底,共计约1 100万kW的海上风电项目处于在建状态,主要分布于广东、江苏、辽宁和福建等地区。

并网保护的关键技术

1. 海上风电场并网技术

海上风电场远离大陆电网,大规模远距离海上风电场的电力输送与并网问题对于海上风能的利用至关重要。目前,国际上主流的海上风电场并网技术路线有高压交流输电、高压直流输电及分频输电,三种并网输电方式各有优劣,可适用于不同的工程场景。主流并网技术的对比如图2所示。

高压交流输电受交流电缆充电电流的影响,只适用于离岸距离不超过70 km的近海小规模风电场。高压直流输电应用于超过70 km的大规模风电并网消纳具有巨大的优势,但换流站的投资成本很高,且海上换流站的安全可靠运行目前还在试验和探索阶段。海上风电的分频输电是控制多个风电机组发电的频率相同,共同汇入交流母线,然后通过

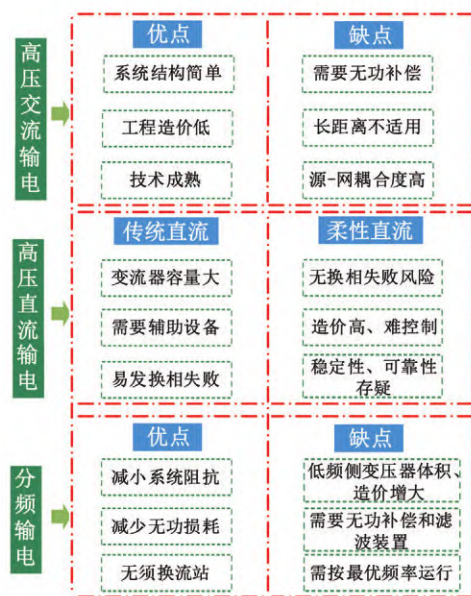


图2 主流并网技术的对比

分频输电装置(交交变频器)并入陆地电网。

有学者的研究表明,海上风电场的离岸距离小于50 km时,高压交流输电成本低于柔性直流输电;大于50 km时,高压交流输电成本高于柔性直流输电;分频输电在30~150 km时,高压比柔性直流输电具有成本优势。上述成本仅粗略地考虑一次性的硬件投资成本,若计及后续运行、维护产生的费用,基于交流系统的分频输电可能具有更大的优势。

2. 海上风电场并网保护问题分析

风速变化导致风力发电机组输出功率发生波动,并与风速呈非线性关系。此外,一些风电机组在并网点电压跌落期间自行退出。此外,风电机组会产生大量的高次谐波导致基频电压和电流相量计算的误差。风电机组的故障特征与同步发电机之间的差异性对传统的线路距离保护性能产生很大的影响。

海上风电场并网保护技术对于风电消纳十分重要,近年来曾因保护缺陷导致海上风电场并网系统发生故障。造成2019年“8.9”英国大停电的原因,是雷击线路诱发海上风电场振荡,随后风电、分布式电源及燃气发电等多机组连锁脱网。停电事故造成英格兰以及威尔士地区的100万用户受到影响,涉及海上风电场的电网保护在事故之后被重新评估和整定。2021年辽宁庄河风电场220 kV交流并网线路投入时,该线路靠近母线的GIS设备A相发生单相接地故障。故障导致母线产生很高的暂态过电压,

使GIS主设备内部发生了不同程度的烧损。事故原因为保护误动和投入期间保护配置不合理，故障点未被快速切除，引起暂态过程持续时间过长。

此外，海底电缆作为构建海上风电场交/直流送出通道的骨干元件，其故障定位对于可持续供电十分重要。2016年3月30日，毛里塔尼亚海岸附近的海底电缆断裂导致毛里尼亚与西非大部分地区通电中断，至少10个邻国出现大面积停电。目前，已经应用的海底电缆故障定位方法很多。例如，有学者提出一种DSP信号处理技术和GPS卫星定位技术结合的海底电缆故障定位法，原理为利用低压脉冲的反射效应，不足之处为测点和故障点接近时会失效。有专家提出了基于时域反射仪的海底电缆早期故障测距方法，需要通过发射电脉冲信号来实现，可识别早期的电缆故障，缺点是准确度不够。随着科技的进步，更加先进的信号采集装置和数字滤波算法被引入到海底电缆故障定位领域，基于小波-人工神经网络、模量分析-机器学习及故障分类-模式识别等新方法被提出，极大地推动了电缆故障定位的发展。海上风电场并网典型事故总结见表1。

表1 海上风电场并网典型事故总结

事件名称	原因	暂态过程	造成影响
英国大停电	雷击	分布式电源脱网、系统振荡	100万户居民供电中断
庄河风电场事故	设备击穿	高幅值过电压、过电流	高压主设备被损坏
毛里塔尼亚海岸事故	海底电缆断裂	功率中断、电网解列	西非10国停电

3. 海上风电场并网保护新技术

故障识别、定位是海上风电送出线保护的核心，目的在于判别是否发生故障，并对故障发生区域进行定位。随着海上风电场的规模增大，其送出线路表现为高压、大容量和长距离的特点，需配置速动性强的单端量保护和可靠性高的纵联保护。现有送出线的保护新技术可概括为四类。

(1) 基于频域特征的识别原理

基于频域特征的识别原理多采用快傅里叶变换、小波变换及经验模态分解等方法，分析提取不同频段的能量分布，在能量分布的高低差异上寻找故障区分的判据。值得注意的是，噪声尤其是高频噪声对该类方法的干扰性很强，一些学者通过增加辅助滤波环节或是求商等数学处理办法消除噪声的干扰，提升保护性能。基于频域特征的识别原理依

赖线路边界对高频信号的滤除或衰减作用，能够有效实现区内、区外故障的辨识，但风电送出系统的高频边界等效和参数选择的可解释性仍有待提高。

(2) 基于时域特征的识别原理

基于时域特征的识别原理是通过数学方法计算线路故障电气量的变化率、变化量、比值及积分等量化表达时域数值特征，也有的引入相关性原理来度量电气量的时域波形差异。基于时域特征的识别原理物理意义明确，计算方法简洁，在可解释性和硬件需求等方面具有优势。不足之处在于，仍需要明确的物理边界来构造区内、区外故障的差异，处理方法过于简单，对数据的挖掘不够，存在难以构造选择性判据的问题。

(3) 基于人工智能算法的识别原理

基于人工智能算法的识别原理结合新兴的网络模型、智能算法，在海量数据集的支撑下对故障数据进行挖掘，进而构造故障辨识模型。目前，人工神经网络、支持向量机、遗传算法及模糊识别算法等已应用于送出线路的故障诊断和定位方面。基于人工智能算法的识别原理的优势在于，无须复杂的阈值整定过程，无须对复杂的风电并网系统进行精确等效。不足之处在于，与其他识别原理相比，需要依赖数值仿真提供海量训练样本，且可解释性和泛化能力有待提高。因为需要海量数据和高投资运算设备的支撑，目前其工程实践性不佳，尚处于科学研究和试验阶段。

(4) 基于行波传播特征的识别原理

基于行波传播特征的识别原理着重分析故障行波沿线路传播和在阻抗不连续点处发生折（反）射的过程，通过提取故障行波的方向、极性、时延和距离等故障特征构造保护判据。基于行波传播特征的识别原理的优势在于可解释性强、不依赖高频边界；缺点在于仅适用于由波阻抗不连续点形成的弱边界特性场景，多个阻抗不连续点时的分析过程复杂，且在阻抗不连续点的附近存在死区问题。

结束语

海上风电是未来我国可再生能源领域重要的发展趋势，发展海上风电能满足我国能源分布和转型的需求。目前我国海上风电开发势头迅猛，上下游产业链格局已经初步形成。EA