海上风力发电场投资成本分析与运维管理

文/龙源（北京）风电工程设计咨询有限公司　佟　博　丁　伟

风电是目前技术最为成熟、最具规模开发条件的可再生能源发电方式，在当前应对全球气候变化的大背景下，风电发展受到了世界各国的高度重视。发展风力发电是优化能源结构的重要手段。

我国海上风电资源丰富，海岸线长度超过1.8万km，海上可开发和利用的风能储量为7.5亿kW，是陆上风能资源量的3倍，开发前景广阔。与陆上风电场相比，海上风速大、湍流度强度低、风向稳定、对环境影响弱，海上风电场靠近沿海发达城市，市场消纳条件好，海上可利用面积广阔，不占用土地等因素，建设海上风电场优势更为突显。

但是海上风电场对风电机组要求更高。面对浮冰、台风、盐雾等恶劣海洋环境，机组更容易出现故障且维修难度大、工期长、费用高。特别在海况恶劣时，难于船舶运输，工人难于靠近机组，维修难度大，海上风电场的运行维护难。我国海上风电起步较晚，缺乏风电场运行维护管理经验，这些都将无形地增加运维成本。

国外风电发展现状

海上风能资源条件直接影响各国对待海上风电发展的态度。欧洲海上风电项目开发始于20世纪90年代，1991年，世界上第一个海上风电场建于丹麦波罗的海的洛兰岛西北沿海的Vindeby附近，装机容量为5 MW。随后，荷兰、丹麦和瑞典陆续建成了一批海上风电示范工程项目，这些项目的建设和运行为海上风电场的建设、运行和维护积累了丰富的经验，设立了专门的海上运行维护船制造企业，建立了多种海上风电运维管理模型，有专门的咨询公司给予咨询服务。欧洲十分重视海上风电场运维管理，通过优化运维模式、加强运维管理水平，对提高海上风电机组的可利用率有很大的成效。

根据全球风能理事会2017年2月10日发布的2016年全球风电发展统计数据，2016年全球海上风电新增装机容量2 219 MW，累计装机容量14 384 MW。海上风电累计装机容量排名前五的国家是英国、德国、中国、丹麦、荷兰。中国凭借2016年大幅增加的海上风电装机容量，超越丹麦，跻身前三。目前，世界上近30个海上风电项目，大部分集中在欧洲包括比利时、丹麦、芬兰、德国、爱尔兰、意大利、荷兰、瑞典和英

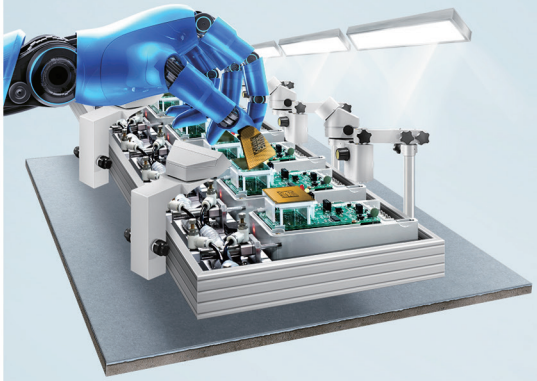
www.eage.com.cn

广告|AD

CHINT

全新电子脱扣器

准确处理故障隐患
高效畅通更可靠



正泰 昆仑 系列
塑壳断路器

领先每一步　可靠新高度

浙江正泰电器股份有限公司
股票代码：601877 | 400-817-7777
www.chint.net/kunlun

国等国家，亚洲地区如日本和中国近年来也开始建设海上风电项目。为减少建造和维护费用，绝大多数项目安装在浅水中，深度低于20 m，离岸线距离不小于20 km。

欧洲海上风电建设造价远比陆上风电场建设高，陆上风电场造价1 300欧元的单位千瓦造价水平，海上风电的造价以投产的3个项目的平均建设成本来看，单位千瓦造价在2 300欧元左右，比陆上要高80%。

国内海上风电发展

我国海上风电发展较晚，2007年底中海油在距离陆地约70 km的渤海湾建成我国第一个海上风电站——中海油绥中36－1风电站，随后上海东海大桥海上风电场、江苏如东30 MW海上试验风电场、江苏如东150 MW潮间带风电场一期示范工程陆续建成并投入运行。由于技术与成本等因素的制约，我国海上风电场发展速度远低于预期，直到2016年才有所改观。中国风能协会的数据显示，2016年，我国海上风电新增装机154台，容量为59万kW，同比增长64%，累积装机容量达到163万kW。

我国大力发展海上风电，逐渐成为未来风电发展的必然趋势。但海上风电价格高于传统能源是风电发展的最大障碍，我国政策性补贴仍将是新能源开发的重要支撑。在政策性补条件下，沿海各地政府纷纷出台当地海上风电开发规划。根据“十二五”可再生能源规划，到2015年我国风电总并网装机容量将达到1亿kW，海上风电累计装机量500万kW，规划到2020年海上风电装机将达到3 000万kW，海上风电将重点分布在江苏、山东、上海、浙江、福建和广东等沿海区域。但海上风电发展明显滞后，风电发展“十三五”规划预计至2020年，全国海上风电开工建设规模达到1 000万kW，力争累计并网容量达到500万kW以上。

表1　欧洲海上风电场投资成本统计

海上风电场	国家	总容量（MW）	风机数	单位投资（百万欧元）	时间	总投资单位投资（欧元／kW）
Middelgrunden	丹麦	40	20	54	2000	1 350
Yttre Stengrund	瑞典	10	5	13	2001	1 300
Horns Rev	丹麦	160	80	272	2002	1 688
Samse	丹麦	23	10	32	2002	1 391
Arklow Bank	爱尔兰	520	200	630	2003	1 212
North Hoyle	英国	60	30	121	2003	1 233
Scroby Sands	英国	60	30	110	2003	1 833
R&D	丹麦	17.2	8	20	2003	1 163
Nysted	丹麦	165.6	72	248	2003	1 630
Kentish F1ats	英国	90	30	159	2005	2 126
Borrow－in－furness	英国	90	30	145	2006	1 611
Burbo Bank	英国	90	24	181	2007	2 011
Lillgrunden	瑞典	110	48	198	2007	1 800
Robin Rigg	英国	180	60	492	2008	2 722

表2　2020年全国海上风电开发布局

序号	地区	累计并网容量（万kW）	开工规模（万kW）
1	天津市	10	20
2	辽宁省		10
3	河北省		50
4	江苏省	300	450
5	浙江省	30	100
6	上海市	30	40
7	福建省	90	200
8	广东省	30	100
9	海南省	10	35
合计		500	1 005

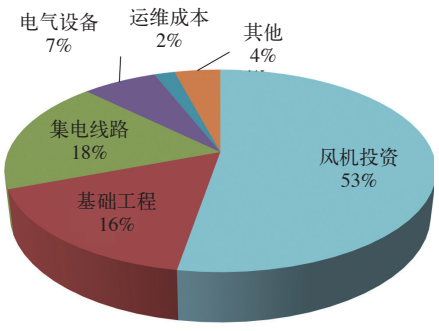


图1　Horns Rev风电场首期预算

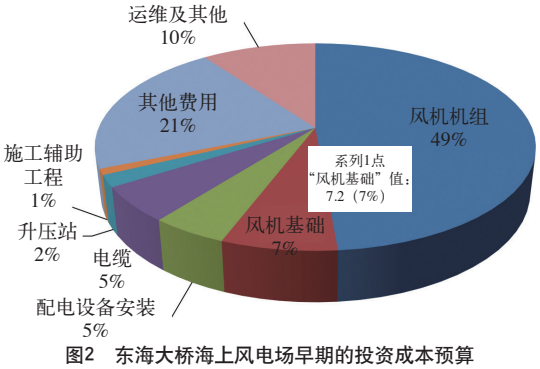


图2　东海大桥海上风电场早期的投资成本预算

投资分析

Homs Rev海上风电场是丹麦公司，在北海日德兰半岛（Jutland）建设，该风电场离岸14～20 km。水深6.5～13.5m，装机容量160 MW，风电场占用面积约20 km^2。该风电场装机总容量160 MW．共装机80台单机容量2 MW的海上风电机组．总投资为2.7亿欧元，单位千瓦成本为1 688欧元。基本接近目前世界上风电场投资成本的平均水平的。

东海大桥海上风电场是国内第一座海上风电场。由上海电力、大唐电力、中广核联合投资兴建。在2010年7月并网发电。工程区位于上海市南汇区海域．风电机组分布于东海大桥两侧，北距南汇嘴岸线8 km．南距南汇嘴岸线约13 km，总装机容量100 MW。投资总额约

为17亿元人民币，单位千瓦成本约为1 640欧元，接近欧洲海上风电场投资成本。

由于我国研究继承了国外海上风电建设的经验与教训，我们少走了很多弯路。风电机组技术、海上施工工艺更为成熟完善，工程造价略优于欧洲风电投资。但是，我国相对于欧洲海上环境（气象与地质条件）更恶劣，海上风电建设还不成熟，专业厂家实力有待提高，运维体系尚需完善，风电场建设与运维的复杂度与难度要高于欧洲。

我国海上风电建设还在初级阶段，风电场多选择在近海、浅海区域，主要原因是安装建设与运行维护便利、成本低。随着海上风电场的建设，在国家政策的支持下，海上风电技术的不断成熟，由浅海风场向深海风场延伸将已是必然趋势。运行维护管理

表3　海上和陆上风电成本比较

	陆上	海上
总投资成本欧元/kW	800～1 100	1 200～1 850
风机（%）	65～75	30~50
基础（%）	5～10	15～25
内部联网和并网（%）	10～15	15～30
安装（%）	0～5	0～30
其他（工程成本，项目管理建设期利息）（%）	5	8

表4　4 MW风机与6 MW风机的投资决策

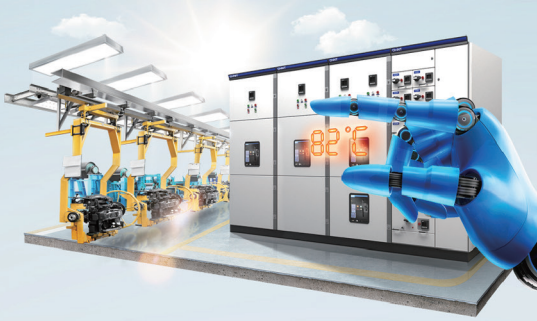
	4 MW风机	6 MW风机
风电场前期核准/（英镑/MW）	85	80
风机叶片/（英镑/MW）	393	507
机舱/（英镑/MW）	632	703
塔筒/（英镑/MW）	690	538
电气/（英镑/MW）	81	67
安装/（英镑/MW）	611	323
建设期保险/（英镑/MW）	38	38
意外开支/（英镑/MW）	174	155
资本支出总计/（英镑/MW）	2 705	2 413
计划管理运营维护/（英镑/MW/yr）	27	21
非计划支出/（英镑/MW/yr）	55	34
其他/（英镑/MW/yr）	2	2
年运输费/（英镑/MW）	63	63
运营期保险/（英镑/MW）	14	14
总运营成本/（英镑/MW/yr）	161	134
理论电量/（英镑/MW/yr）	4 520	5 118
净电量/（英镑/MW/yr）	3 691	4 280
停运拆除支出英镑/（英镑/MW）	397	210
能源耗费/（英镑/MW）	100	75

表5　风机运维成本

风机	项目	风电场年度运维预算/（英镑/MW）			
		A类	B类	C类	D类
4 MW	运维成本	26	27	28	31
	非计划支出	53	55	57	64
	其他	2	2	2	3
	合计	82	84	86	98
6 MW	运维成本	21	22	23	26
	非计划支出	44	45	46	53
	其他	2	2	2	2
	合计	67	69	71	80
8 MW	运维成本	20	20	21	24
	非计划支出	41	42	43	49
	其他	2	2	2	2
	合计	62	64	65	74

（下转38页）

www.eage.com.cn

广告AD
CHINT
实时温度传感器
持续提示运行状态
洞悉风险更可靠

正泰 昆仑 系列
万能式断路器

领先每一步　可靠新高度
浙江正泰电器股份有限公司
股票代码：601877 | 400-817-7777
www.chint.net/kunlun

可编程直流负载：用来模拟各种电池充放电全过程的能力，如恒流模式、恒压模式、恒阻模式、恒功率模式等，模拟电池组的阻抗，满足直流输出过程中各种模式下功率的消耗，过程可持续稳定，同时具备突加突卸等情况的状态模拟。可编程直流负载可以用于储能电池组容量试验检测，精确测量电池组容量。

智能开关柜：智能开关柜由L1、K1、K2、K3、K4、K5组成，开关采用ABB－400 A断路器组成。开关柜配备PLC控制板，实现远程开关状态的读取和开关控制。L1并网开关带有缓启动电阻，避免启动冲击电流。电站接入开关具备三相电量检测传感器、电流波形信号传感器，电网接入开关具备三相电量检测传感器、电流波形信号传感器。

波形记录仪：连接于分布式电源并网变流器的输入输出侧，同时记录电网侧的电流波形和逆变器侧的电压波形。

功率分析仪：连接于分布式电源并网变流器的输入输出侧，能测试逆变器的效率、谐波、并网功率、功率因数、谐振频率、基频电流等参数。

集控系统：包括工控机、显示器、通讯模块集成、控制集成、信号显示集成、电站参数、电网参数采集集成。能够实现远程对系统设备的控制和参数设置。能够实现测试数据的实时显示和保存。

自动收放线装置：解决人工收放线费时费力难题。在电网接入端采用电缆型号YJV120，A、B、C、N四根线，每根长度为50米；一根长度50 m接地线YJV70。在电站接入端采用电缆YJV120，A、B、C、N四根线，每根长度为50 m。

结束语

随着能量需求呈现多样化和分布化趋势，多能互补分布式发电系统建设随之大力普及，以多能互补为中心的综合能源系统研究和工程实践也随之展开。为保证现场环境下分布式电源并网安全可靠性，本文设计一种应用于现场测试的多能互补性分布式能源系统的移动检测平台。整个平台采用集成化设计安装于移动测试车上，其硬件系统包括电网扰动装置、防孤岛试验装置、可编程直流负载、智能开关柜、测量单元等。通过上位机软件控制设备及系统的数据分析统一进行处理，同时按照预设的格式出具试验报告。多能互补性分布式能源系统移动检测平台用于容量200kWp以内的分布式光伏电站、风力发电站以及储能电站多种分布式能源现场并网检测，且能够适应不同检测标准要求。**EA**

（上接第33页）

问题必需直面应对。由于受到风电机组技术的局限性以及受海洋恶劣的条件的影响，海上风电场的运行与维护，相对于陆上而言难度更大，要求更高。由于我国海上风电场运维经验不足，海上风电运输能力有限，运维难度大，运维费用昂贵。

针对我国海上风电场的特点，研究科学、合理的运维管理模式，是我国大规模开发海上风电的必要前提。

海上风场环境恶劣，风电机组必须满足气密、干燥、换热和防腐等更高的技术要求。海上风电机组的单机容量较大，有的还需配备安装维修的专用的停机坪、起重机等专用配套设施，都增加了海上风电机组的成本。表3列出了海上和陆上风电的成本结构。其中，海上风电的投资成本高于陆上，主要是基础、并网和安装的成本较高，此外运输和维修成本也比陆上高得多。

由于海上征地制约因素少，风电机组设备布置更多、分布更广。然而，海上风电场处于气候变化较大区域，对风电机组有效的检修、维护影响很大。根据欧洲风场的经验，因气候影响导致取消检修的次数约占成功检修次数的15%，而在我国情况更不乐观。

海上风电机组功率容量与机组的体积与陆上风机相比更大，加之条件恶劣，海上风电机组的故障率相对较高。维修需要投入专业船舶，难度大且费用昂贵，加大了运维成本。据统计，海上风机运行维护成本是陆上机组的2～4倍甚至更高。据GARRAD HASSAN风能咨询公司统计，通常机组的长期可利用率可达97%左右。每年每台机组的平均运行和维护成本约为3～10万欧元。迫切需要研究风电场整体运维效率以降低其运维成本。

结束语

毋庸置疑，海上风电场成本要远远高于陆上的成本，运行经验与配套行业略逊于欧洲国家。虽然我国海上风电场建设才刚刚起步，但是我们能够积极汲取国外风电场建设、运维、管理的成功经验与失败教训。结合我国海上风电场的实际，通过优化运维模式，加强运维管理水平，一定能更好利用海上风能资源，实现我国海上风电产业后来居上、扬帆起航。**EA**