

[风电]

海上风电场电气二次设计原则和要点

文/上海勘测设计研究院有限公司 严玉峰

目前已建成的海上风电场大多离岸距离在40 km以内，建设海上交流升压站将电能通过交流海缆接入陆上集控中心后再并网发电。通过对海上风电场工程的设计实践，总结经验，研究提出海上风电场、海上升压站及其陆上集控中心电气二次设计原则和要点，为今后设计提供借鉴。

设计原则

海上风电场电气二次设计应满足陆上集控中心无人值班（少人值守）、海上升压站和风力发电机组无人值守的要求，满足接入系统电气二次设计要求。

海上风电场宜全场统一设置一套计算机监控系统，监控范围包括全场风力发电机组及其升压设备、海上升压站以及陆上集控中心，且应在陆上集控中心实现全场集中监控和管理。

为满足现地控制、保护、测量、信号及通信等要求，除必须布置于海上升压站和海上风力发电机组内的电气二次设备外，其余设备应集中布置于陆上集控中心，便于运行和维护。

海上风电场计算机监控系统

1. 海上风电场集中监控系统

1) 计算机监控系统应能实现对海上风电场全场机电设备进行可靠、合理和完善的监视、测量及控制，并具备遥测、遥信、遥控和遥调等全部的远动功能及时钟同步功能，具有与远方调度中心和远程集控交换信息的能力。具体功能要求和技术指标应满足DL/T 5149、NB/T 31083和NB/T 31071要求。

2) 海上风电场监控系统主系统设置于陆上集

控中心，在海上升压站配置子系统，系统间通过专用光以太网通信设备组网连接，级联端口宜采用1 000 Mbit/s带宽。在陆上集控中心可完成对风电机组、机组升压变压器及环网柜、海缆、海上升压站及陆上集控中心的机电设备的监视、控制及调度管理。

3) 陆上集控中心应配置两台冗余热备的远动工作站。远动工作站应采用无硬盘型专用装置。海上升压站和风电机组远动信息采用专用光以太网通信设备接入陆上集控中心计算机监控系统，由陆上集控中心远动工作站一并向调度端传送。

4) 监控系统宜采用双以太网结构，网络传输协议宜采用DL/T 860。监控系统间隔层的测控装置直接通过网口连接站控层网络，测控装置直接与站控层通信。在站控层网络失效的情况下，间隔层应能独立完成就地数据采集监测和控制功能。

5) 陆上集控中心和海上升压站应配置时钟同步系统，采用双主时钟配置，每台时钟应能同时接收北斗和GPS基准时间信号，应能对场站内各种系统和设备的时钟进行统一对时，对时接口优先选用IRIG-B（DC）对时方式。

6) 陆上集控中心应设置微机五防主站，同时在海上升压站设置微机五防子站。陆上集控中心

应能在微机五防工作站上集中显示各个子站的一次设备状态,子站微机五防工作站能显示本站一次设备状况,主子站之间通过通信通道实现信息共享。主子站均配置操作票专家系统,既可由主站开票,也可由子站开票,操作完毕主站或子站均可回传。

2. 海上风电机组监控系统

1) 风电机组监控系统主要由风电机组现地间隔层设备、风电机组场控层设备和数据通信网络设备构成。场控层主要布置于陆上集控中心。在海上升压站宜配置有操作员站,便于调试和维护。

2) 风电机组场控层网络宜采用双以太网星形结构,风电机组现地间隔层设备宜根据集电线路路由分组情况采用若干光纤以太网环网结构接入风电机组场控层。风电场内通信传输介质采用单模光电复合海缆。布置于海上升压站与布置于陆上集控中心的风电机组场控通过两站间的专用以太网通信设备组网连接。

3) 风机现地间隔层设备应包含机组升压变压器和环网柜保护测控装置,能监测设备的运行状态、电气参数、事故及故障信息,具有现地/远方控制功能等。装置应能接入风机现地控制系统,通过风机组监控环网将信息上传至风电机组监控系统场控层,同时能接收风电机组场控层的命令。

(4) 风电机组监控系统应提供标准通信接口和通信协议接入全场计算机监控系统。

继电保护和安全自动装置

1) 风力发电机保护应装设电流速断、过电流保护、发电机定子绕组单相接地故障保护、过负荷保护、低电压和过电压保护、低频和高频保护、三相电压不平衡保护以及非电量保护等。

2) 风电机组单元变压器保护、单元变压器高压侧配置断路器时,应配置变压器保护装置,具备完善的电流速断、过电流和过负荷保护功能。风电机组单元变压器低压侧设置空气断路器时,可通过电流脱扣器实现风机出口至变压器低压侧的短路保护。

3) 汇集线路在汇集母线侧配置一套线路保护。对于相间短路,应配置阶段式过电流保护,还宜选配阶段式相间距离保护。中性点经低电阻接地系统,应配置两段式零序电流保护,动作于跳闸。海缆线路还应配置过负荷保护,动

作于信号。

4) 汇集母线保护应装设专用母线保护。母线保护应具有差动保护、分段充电过电流保护、分段死区保护和复合电压闭锁功能。母线保护各支路宜采用专用电流互感器二次绕组,且其相关特性应一致,避免在遇到较大短路电流时,因各电流互感器的暂态特性不一致导致保护误动作。

5) 接地变压器电源侧应配置电流速断保护、过电流保护作为内部相间故障的主保护和后备保护,并配置非电量保护。

接地变压器应配置两段式零序电流保护作为接地变压器单相接地故障的主保护和系统各元件单相接地故障总后备。零序电流取自接地变压器中性点回路中的零序电流互感器。

接地变压器接于低压侧母线,电流速断和过电流保护动作于跳开接地变压器和主变压器同侧断路器;零序电流保护I段动作于跳母联,II段动作于跳开接地变压器和主变压器同侧断路器。

接地变压器直接接于主变压器低压侧出口,电流速断和过电流保护动作于跳开主变压器低压侧断路器;零序电流保护I段动作于跳母联,II段动作于跳开主变压器低压侧断路器。

对于低压侧为双分裂绕组(Y/△/△)运行主变压器,且接地变压器通过断路器接至35 kV母线的升压变电站,当分支1的低压母线故障跳闸后(仅跳分支1低压开关),分支2仍独立运行时,主变压器分支1及其连接的电缆存在接地风险且不易发现(故障未消除),此时接地变压器保护动作逻辑宜跳主变压器高压侧,即整套变压器停运,以快速切除故障保证电气设备安全。

6) 主变压器保护,220 kV及以上电压等级变压器按双重化原则配置主、后备一体的电气量保护,同时配置一套非电量保护。110 kV电压等级变压器配置主、后备一体的双套电气量保护或主、后备独立的单套电气量保护,同时配置一套非电量保护。变压器主保护应采用相同类型电流互感器,各侧电流互感器变比不宜使平衡系数大于10。330 kV及以上电压等级变压器高压侧配置过励磁保护。

7) 110 kV及以上海缆线路保护,220 kV及以上电压等级海缆线路按双重化原则配置主、后备一体的电气量保护。110 kV电压等级海缆线路配置主、后备一体的单套电气量保护。每套线路保护应配置光纤分相电流差动作作为主保护,还应配

置完善的后备保护（包括过负荷保护）并具有远方跳闸功能。

8) 220 kV及以上并联电抗器保护, 220 kV及以上电压等级并联电抗器按双重化原则配置主、后备一体的电气量保护, 同时配置一套非电量保护。电气量保护主要包括纵联差动保护、匝间短路保护、过电流保护、零序过电流保护和过负荷保护。线路并联电抗器保护动作于断开线路本侧断路器的同时还应起动作远跳, 断开线路对侧断路器。

9) 海上风电场升压站及陆上集控中心应配置故障录波器。故障录波器应能记录故障前10 s至故障后60 s的电气量数据, 暂态数据记录采样频率不小于4 000 Hz。海上升压站与陆上集控中心的录波网通过专用光以太网通信设备组网后, 在陆上集控中心经调度数据网II区将信息发送至调度端主站。

10) 海上风电场宜在陆上集控中心为全场统一配置一套保护信息管理子站。海上升压站与陆上集控中心的保护网通过专用光以太网通信设备组网后接入保护信息管理子站, 由子站经调度数据网I区将信息发送至调度端主站。

11) 安全稳定控制装置应根据接入系统设计的要求装设, 其控制策略通过风电场接入系统安全稳定分析研究确定。

调度自动化

1) 海上风电场调度管理关系应根据电网“统一调度, 分级管理”的原则确定。远动信息内容应依据DL/T 5003标准并结合各级调度端需求确定。

2) 海上风电场宜全场统一配置远动系统, 应双机冗余热备, 安装于陆上集控中心。海上升压站和风电机组远动信息采用专用光以太网通信设备接入陆上集控中心远动系统, 由陆上集控中心远动系统统一向调度端传送, 并接收调度端的指令。

3) 海上风电场宜全场统一配置电能量采集终端, 宜安装在陆上集控中心。海上升压站电能量信息宜通过专用光以太网通信设备接入该电能量采集终端, 以实现上网电能量的计量、分时存储、处理以及与上级调度中心计量系统通信的功能, 同时具有与升压站监控系统通信及对时功能。

4) 海上风电场宜全场统一配置同步相量测量

系统, 包括同步相量测量单元、数据集中处理单元和网络交换机等设备。数据集中处理单元宜按双机配置且设置于陆上集控中心, 测量装置在海上和陆上分别按需配置, 海上的相量测量信息宜通过专用光以太网通信设备接入陆上集控中心数据集中器, 一并通过调度数据网I区向调度上传信息。采集的信息量应满足调度要求。同步相量测量装置应采用站内统一对时源对时。

5) 海上风电场应全场统一配置有功功率和无功功率控制系统, 控制对象包括风电机组、电容器和电抗器、动态无功补偿装置以及主变压器, 控制系统应以满足调度对有功功率、无功功率和电压控制的要求, 实现调度统一安排AGC/AVC功能。控制系统应满足GB/T 19963、NB/T 31083要求。

6) 海上风电场应全场统一配置风电功率预测系统。预测系统的功能和性能应满足GB/T 19963、NB/T 31046和NB/T 31079要求。

7) 海上风电场应配置电能质量监测装置, 实时监测风电场的电能质量, 包括电压偏差、电压变动、闪变和谐波等, 并能按照调度要求上传有关信息。

8) 海上风电场应按照“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证、综合防护”的原则为全场统一配置调度数据网接入设备、综合数据网接入设备及二次安全防护系统, 其设备配置、功能和性能应满足《电力监控系统安全防护规定》(国家发展和改革委员会令2014年第14号)、《电力监控系统安全防护总体方案等安全防护方案和评估规范》(国能安全[2015]36号)以及GB/T 36572要求。

交直流控制电源

1) 海上升压站和陆上集控中心的交直流控制电源包括直流电源、交流不间断电源(UPS)、逆变电源(INV)以及通信用直流变换电源(DC/DC)。交直流控制电源系统设计应符合DL/T 5044和DL/T 5491规定。

2) 直流电源系统电压宜采用220 V。系统宜配置两组蓄电池、两组高频开关充电装置, 采用两段单母线接线, 两段母线之间应设联络电器。蓄电池应选用阀控式密封铅酸蓄电池。事故放电计算持续时间宜不少于2 h。高频开关充电模块宜按 $N+1$ 或 $N+2$ 热备份配置。直流电源系统宜按组

配置微机监控装置、微机绝缘监测装置和蓄电池自动巡检装置。

3) 交流不间断电源(UPS)应选用电力专用交流不间断电源装置,应为在线式,直流进线取自站内DC 220 V直流电源。宜采用双重化冗余系统,两台UPS分列运行方式,输出交流母线为单母线分段,设置分段开关。UPS负荷主要包括计算机监控系统设备(含风电机组计算机监控系统设备)、调度自动化设备、火灾自动报警系统、视频和环境监控系统、无线及应急通信系统等。

4) 逆变电源(INV),应选用电力专用逆变电源装置,可采用单机配置,直流进线取自站内DC 220 V直流电源。容量应根据事故照明负荷确定并考虑一定裕度。

5) 通信直流电源系统宜优先采用两套独立的DC/DC变换装置,直接接于站内DC 220 V直流母线上,经有效隔离变换成48 V后为通信负荷供电。每套DC/DC变换装置的直流电源宜采用单电源供电,其48 V输出端正极接地。DC 48 V宜采用单母线分段带分段开关接线。

6) 风力发电机组二次系统场控层设备电源宜取自陆上集控中心或海上升压站的DC 220 V直流电源或电力专用不间断电源,保证供电的可靠性。

每台风力发电机组现地应配置不间断电源或直流电源,且宜冗余配置,其蓄电池容量宜按事故放电计算持续时间不少于2 h配置。其负载至少包括机组及其升压变和环网柜的控制、保护、测量和信号负荷、各在线状态监测系统负荷、火灾自动报警系统和视频监控系统负荷、IP语音通信系统负荷、事故照明负荷以及其他有不间断供电需求的负荷。蓄电池宜选用阀控式密封铅酸蓄电池。

视频监控系统

1) 海上风电场视频监控系统宜采用全数字化的网络视频监控模式,在陆上集控中心设置集中监控站,可对全场范围包括海上风电机组、海上升压站及陆上集控中心实施全面视频监控。在海上升压站设置分控站。

2) 视频监控系统采用分层分布式结构。风电机组前端视频信号宜按集电线路路由采用若干千兆光纤以太网网接入海上升压站分控站站控层,分控站视频信号宜通过千兆光纤以太网接入陆上集控中心站控层。

3) 视频监控系统能与火灾报警系统通过数据接口进行连接,接收火灾报警系统的任何一点的火警信号,实现与火灾报警系统的联动功能。即当发生火灾时,火灾发生点处附近的摄像机应能跟踪拍摄火灾情况,同时,监视器画面应能自动切换,以显示火灾情况。

火灾自动报警系统

1) 火灾自动报警系统设计应符合GB 50116、GB 50229规定。火灾自动报警系统应实时监测全场包括风电机组、海上升压站及陆上集控中心的火灾状况,并可根据消防要求进行联动控制。

2) 陆上集控中心和海上升压站均设置集中报警系统。海上升压站报警系统应通过海底光电复合缆与陆上集控中心报警系统相连,实现在陆上集控中心对海上升压站火灾自动报警系统的监视和控制。

3) 陆上集控中心火灾报警控制柜应安装于中央控制室(兼消防控制室),应能对重要生产和电气设备集中场所进行火灾探测和对有关消防设备进行控制,并接收海上升压站和风电机组报警控制系统的火灾及控制动作反馈信息。控制中心报警系统可对系统中的各种消防控制设备进行自动和手动控制。

4) 风电机组火灾报警系统一般由风机厂家配套提供,应能有效监测并判断火灾状态,火警及联动信号可上送陆上集控中心火灾自动报警控制器,可手动和自动起动作灭火,同时也可接受来自远方的手动强制灭火。火灾探测区域应包括轮毂、机舱、塔架电缆通道和塔底控制柜等重点区域。

5) 火灾报警控制器应向视频监控系统输送火灾报警控制器系统内任何一点的火警信号,以实现视频监控系统监视画面与火警信号的视频联动。

6) 火灾报警控制器应向计算机监控系统输出的无源空接点信号至少包括:火灾报警控制器装置自身的故障信号、火灾事故信号和消防联动控制信号。

通信

1) 海上风电场通信设计应符合DL/T 5391、DL/T 5225和国际海事组织《国际海上人命安全公约》(SOLAS公约)及全球海上遇险与安全系统

GMDSS的相关要求。

2) 风电场系统通信应根据风电场接入系统的通信设计确定。通信业务包括：调度电话、调度自动化、系统继电保护及安全自动装置和生产管理信息等。

3) 海上升压站与陆上集控中心的场内通信应具备2条独立的通信通道，宜选择数字光纤通信方式，海上升压站与陆上集控中心的通信不得中断。海上升压站与陆上集控中心的光传输设备宜选用SDH，且应双套冗余配置。

4) 海上风电场应配置一套场内生产调度及管理电话系统，宜采用具有IP语音交换功能的数字程控调度交换机。主机设置于陆上集控中心，海上升压站及海上风电机组分别部署IP语音网关和IP电话，实现全场语音通话业务。

5) 海上升压站的无线通信应至少设置1套无线对讲系统，作为平台内部通信方式。应设置2套海洋船舶专用甚高频—调频（VHF—FM）无线通信系统，作为与周围作业船只的通信方式。

6) 海上升压站应急通信系统应至少包

括：1台能发送和接受的VHF（A1海区）或MF（A2海区）双向无线电装置；1台搜救雷达应答器（SART）；1台航行警告接收系统（NAVTEX）、1台应急无线电示位标（A1海区）或应急卫星示位标（A2海区）。

7) 海上升压站和陆上集控中心的通信电源宜采用一体化电源的通信用直流变换电源，与场站内控制保护直流电源共用蓄电池。当风电场接入系统设计有要求时也可采用带专用蓄电池的直流电源系统。

结束语

目前已建成的海上风电场大多离岸距离在40 km以内，建设海上交流升压站将电能通过交流海缆接入陆上集控中心后再并网发电。未来随着海上风电进一步开发，离岸距离越来越远，当离岸距离超过60 km以上时，由于交流电缆充电功率的问题，将会越来越多采用直流海缆，建设海上换流站，会对海上风电场电气二次设计提出更多更复杂的要求。EA

（上接第21页）

表8 试点城市城市能源互联网发展潜力综合得分及排名

城市	经济发展水平	科技发展状况	基础设施条件	投入水平	生产潜力	消费潜力	发展程度综合得分	排名
天津	0.423 0	0.371 9	0.764 8	0.453 6	0.931 1	0.614 0	3.558 3	3
上海	0.239 0	0.159 0	0.301 4	0.166 7	0.330 2	0.329 4	1.525 8	4
嘉兴	0.711 6	0.570 1	0.800 3	0.802 0	0.796 2	0.868 2	4.548 5	1
厦门	0.491 6	0.540 5	0.458 5	0.776 1	0.818 0	0.843 9	3.928 7	2

最后，根据相对潜力模型得到城市试点城市（天津、上海、嘉兴和厦门）的城市能源互联网发展潜力的综合得分及排名。

通过上述计算和分析结果可知，经济发展水平与城市能源互联网发展潜力不是正相关的关系，也就是说，对于经济发展水平高的城市来说，其城市能源互联网发展潜力不一定高。以城市能源互联网发展潜力得分为依据，可对各城市的城市能源互联网发展潜力进行排名：嘉兴>厦门>天津>上海。

本文主要对城市能源互联网的发展潜力进行了评估，在定义城市能源互联网发展潜力的基本概念基础上分析了城市能源互联网发展潜力的主要研究内容。其次，确定了城市能源互联网发展潜力的影响因素。再次，构建了城市能源互联网发展潜力评估指标体系。最后，运用混合加权法对主客观权重赋权及基于TOPSIS价值函数的评估模型与相对潜力测算模型，并选取评估了四个试点城市的城市能源互联网发展程度和发展潜力，得到城市能源互联网发展潜力排名：嘉兴>厦门>天津>上海。EA