

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.005

海上风电场孤网状态下的备用柴油发电机方案研究

郑明¹, 杨源¹, 沈云¹, 徐晓燕¹, 陶艳²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 四川大学 电气信息学院, 成都 610065)

摘要: [目的]为保障海上风电场孤网状态下的安全可靠运行,对备用柴油发电机组的配置方案与运行方式进行了研究。[方法]通过对孤网状态下的电气负荷、无功过电压、短路电流、谐波及保护整定进行分析,来验证备用柴油发电机组配置方案的合理性。[结果]研究表明:在文章给定的案例下,配置额定容量为1.2 MW的备用柴油发电机及2 Mvar的电抗器时,在运行维护的工况下,一半风机接入孤网时可满足风机和海上升压站的负荷需求和电压要求,也满足35 kV海缆无功需求。同时,为了避免谐波谐振,不推荐孤网备用柴油发电机组为风机提供偏航电源。对于柴油发电机组升压变压器、海上升压站接地变兼站用变,推荐采用复压过流作为主保护。[结论]配置方案为研究海上风电场孤网运行方案提供了思路。

关键词: 海上风电场; 孤网状态; 无功过电压; 保护整定

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)01-0024-07

Research on the Standby Diesel Generator Set Scheme of Offshore Wind Farm in the State of Island Operation Mode

ZHENG Ming¹, YANG Yuan¹, SHEN Yun¹, XU Xiaoyan¹, TAO Yan²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: [Introduction] In order to ensure the safe and reliable operation of offshore wind farm, this paper analyzes the configuration scheme and operation mode of standby diesel generator set under the condition of isolated networks of offshore wind farm. [Method] Considering the diesel generator capacity accounting, reactive overvoltage, short-circuit current, harmonic analysis and protection setting under the condition of isolated grids of offshore wind farms, the rationality of the standby diesel generator set scheme was verified. [Result] The results show that the standby diesel generator set with rated capacity of 1.2 MW can meet the load requirements and voltage requirements of offshore wind turbines and offshore wind station under the condition of operation and maintenance, with half of the wind turbines connected to island operation mode and 2 Mvar reactors, also meet the 35 kV submarine cable reactive demand. At the same time, in order to avoid harmonic resonance, diesel generator is not recommended to provide yaw power for the wind turbines. For transformer of diesel generator and grounding transformer for offshore wind station, it is recommended to use recompression and overcurrent as main protection. [Conclusion] The configuration scheme of this paper provides a solution to the study of the isolated operation mode of offshore wind farms.

Key words: offshore wind farm; island operation mode; reactive power overvoltage; relay protection setting

海上风电场分布广阔、海上气候环境恶劣,风电场的运行维护工作十分困难。如何确保海上风电

机组、海上升压站的安全、可靠运行,是海上风电场建设的关键所在。

当海上风电场高压送出海底电缆发生事故或台风造成陆上送出架空线路故障时,海上风电场将失去外部电网联系。海上风电机组在失电后的较短时间内虽然有一定的保持通讯控制能力,但已不具备

收稿日期: 2018-06-12 修回日期: 2018-11-20

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电场大孤岛方式备用柴油发电机运行关键技术研究”(EV04921W)

抗盐雾、偏航、顺桨等大功率电机操作的能力。同时, 根据规范要求, 海上升压变电站需配应急电源, 确保通信电源、监控电源、事故照明、事故通风、消防火灾系统、逃生设备和导航设备等应急负荷^[1]。柴油发电机组除了作为海上升压站的应急电源之一, 也有项目中用于为孤网情况下的风电机组提供备用电源, 使得风电机组内的辅助设备在电网断电超过一定时间后能通过该电源供电的方式使其保持在工作状态, 西门子公司称这种方式为大孤岛模式(Big island operation)^[2-3]。

国外海上升压站多配置了用于大孤岛模式的柴油发电机组, 给风电场全部风电机组的防潮维护提供电源^[4], 柴油发电机组的容量是否需考虑风机的偏航负荷, 由风机厂家确定。国内目前只有华能江苏如东海上风电场和国电浙江普陀六号海上风电场采用了“大孤岛模式”, 据了解, 华东如东海上风电场并没有考虑风机偏航负荷, 普陀六号海上风电场工程则考虑了风机的偏航负荷。

孤网状态下柴油发电机组的配置方案与运行方式是本文的研究重点。此时, 海上升压站的柴油发电机组需保障海上升压站和风电机组的应急负荷需求, 本文拟分析孤网状态下风电场内部电网的潮流、短路电流、无功过电压、谐波及保护整定方案。

1 孤网状态备用电源的应用场景

孤网状态下备用电源可分抗台风应用场景和运行维护应用场景。两者的区别在于是否考虑偏航负

荷。抗台风场景下, 台风期间孤网时, 柴油发电机组为风机的偏航电机提供电源, 通过主动调整机舱角度, 减少风机的荷载, 保护风机。运行维护应用场景则是在孤网期间, 为风机的防潮、除湿、加热等提供电源。

本文以某 5.5 MW 风机为例, 分析抗台风场景和运行维护场景的负荷需求。

1.1 抗台风场景下的负荷分析

1.1.1 风机负荷

每台风机配置了偏航驱动柜(含 13 个偏航电机及整流、逆变模块), 负荷容量为 116.4 kW。在抗台风场景时, 主要考虑为风机的偏航驱动柜供电。

1.1.2 海上升压站负荷

根据规程要求, 海上升压站应急电源在应急工况时, 需符合下列规定:

1) 电动消防泵、应急照明、火灾报警系统、消防广播系统及其他紧急状态下所需要的通信设备、断续使用的手动失火报警按钮和所有在紧急状态下使用的内部信号设备等, 供电的持续时间不应小于 18 h。

2) 国际海事避碰规则要求的航行灯、信号灯、声响信号, 以及标识建筑外廓的信号灯或声响信号, 供电的持续时间不应小于 4 d。

本项目中, 海上升压站的应急负荷统计如表 1 所示。海上升压站的应急电源合计约 220 kW。

1.2 运行维护场景下的负荷分析

1.2.1 风机负荷分析

在电网断电的情况下, 为了给风机设备提供必

表 1 海上升压站内的应急负荷

Tab. 1 Load statistics of offshore wind station under anti-taiwan scenarios

名称	额定电压/V	额定容量/kW	应急 MCC 段							备注
			安装台数/台	运行方式/台			计算功率/kW	电流/A		
				连续	间断	备用		连续	间断	
应急照明配电箱	380/220	2	2	2	—	—	4	18.182	0	经常连续
UPS 主输入	380	20	1	1	—	—	20	90.909	0	不经常连续
直流控制系统	380/220	20	1	1	—	—	20	90.909	0	经常连续, 包含导航系统
临时休息室动力电源箱	380/220	5	1	1	—	—	5	22.727	0	不经常短时
吊车	380	25	1	—	1	—	12.5	0.000	50	不经常短时
不锈钢高压细水雾消防泵组及水箱	380/220	186	1	1	—	—	186	845.450	0	不经常短时
消防动力箱	380	3	2	2	—	—	6	27.273	0	不经常短时

注: 动力负荷合计 P_{1js} 为 204.50 kW, 其他负荷合计计算功率为 44.00 kW, 计算负荷为 217.825 kW。

要的维护保养,需考虑电气防潮及齿轮箱润滑油电源,此外,还需要给照明系统、视频监控、SCADA系统、柜内风扇、航空灯、消防系统、在线振动监测系统提供电源。

对于本文给定的机型,具体负荷需求如表2所示。

表2 运行维护时的风机负荷

Tab. 2 Load statistics of offshore wind turbines under anti-taiwan scenarios

供电位置	耗电器件	器件功耗/W
塔基柜	视频监控	15
	SCADA系统	10
	塔筒照明	680
	柜内照明	40
	柜内风扇	15
	柜内加热器	2 700
	24 V 供电回路	764
	供电插座	190
	航空灯	30
	视频监控	15
机舱柜	液压站照明1	74
	液压站照明2	74
	柜内照明	40
	柜内风扇	15
	柜内加热器	3 200
	应急润滑齿轮泵电机	3 000
	24 V 供电回路	2 200
	供电插座	95
	消防系统	1 000
	在线振动	50

单台风机的负荷容量合计约为14.07 kW。

1.2.2 海上升压站负荷分析

在运行维护场景下,海上升压站的应急电源和在抗台风场景没有区别,同样为220 kW。

2 孤网备用电源主接线分析

以某海上风电场项目为例,对孤网状态下的主接线进行分析,如图1所示。

风电场总装机容量为198 MW。设一座220 kV海上升压站,布置两台220/35 kV,容量为110 MVA的主变压器,220 kV侧采用2进1出单母线接线,35 kV侧采用单母分段接线;采用1回220 kV三芯 $3 \times 500 \text{ mm}^2$ XLPE绝缘海底电缆送至陆上

集控中心。

主要设备选型如下:

1) 风力发电机组

采用单机容量为5.5 MW的变浆驱动风力发电机组。每套风力发电机组配置一套升压设备,升压变压器选用干式变,容量为6.1 MVA。

2) 海底电缆

集电线路的电压采用35 kV,集电拓扑方案为风机按8个回路布置,各个回路考虑功率分布平衡,连接4~5台风机,风机连接电缆不交叉重叠。

2.1 系统接线

海上升压站设置1台风电场备用柴油发电机组,通过1台35/0.4 kV升压变压器接入35 kV II段母线,I、II段母线间设置一个分段断路器,为单母线分段接线。正常运行时分段断路器打开,当风电场系统侧失电时,至主变低压侧的2路进线断路器打开,35 kV母线分段断路器闭合,柴油发电机组可对35 kV母线上的各回线路风机供电,通过35 kV海缆输电至各台风机。同时,还需在35 kV母线上装设并联电抗器来补偿35 kV海缆的充电功率^[5-6]。

2.2 设备参数

孤网状态下运行的主要电气设备为:

1) 柴油发电机组

额定容量:1.2 MW,功率因数为0.8(滞后),即无功容量极限值为900 kvar。具备就地/远方启动功能。按满负荷连续运行100 h设计,1.2 MW柴油发电机组满载时每小时耗油量为约360 L,故油罐容量为 $360 \times 100 / 1\,000 = 36 \text{ m}^3$ 。

其中AVR的电压调节率是 $\pm 1\%$,开路励磁时间常数为2.23 s。同时,X_d直轴同步电抗为3.18,X'_d直轴瞬态电抗为0.19,X''_d直轴超瞬态电抗为0.14。

2) 柴油发电机组升压变压器

变压器容量选择1.6 MVA,35 $\pm 2 \times 2.5\%$ /0.4 kV,采用D,yn11接线,短路电压为 $U_d = 6\%$ 。

3) 35 kV电抗器

由于35 kV海缆容性电流的存在,需装设电抗器进行无功补偿,电抗器容量按所带35 kV海缆电容电流进行过补偿。配置的35 kV电抗器容量与35 kV海缆的串数有关。暂定配置的电抗器容量取2.0 Mvar,并带-5%, -10%, -20%无载分接档位。

4) 接地变兼站用变

IEEE-C62.92.3 标准规定变压器 10 s 的允许过载系数为额定容量的 10.5 倍, 即接地变压器的额定容量为其短时容量的 1/10.5。接地变容量为: $\sqrt{3} \times 36.75 \times 200 / 10.5 = 1.212 \text{ MVA}$, 取 1.6 MVA。站用变容量结合整个海上升压站电气负荷和同时系数, 求得 604.3 kVA, 取 630 kVA。

站用变容量为 630 kVA, 站用变功率因数按 0.8 考虑, 则考虑站用变后, 接地变兼站用变的容量为:

$$S = \sqrt{(\text{站用变容量} \times \cos\varphi)^2 + (\text{站用变容量} \times \sin\varphi + \text{接地变容量})^2} \quad (1)$$

则:

$$S = \sqrt{(630 \text{ kVA} \times 0.8)^2 + (630 \text{ kVA} \times 0.6 + 1.212 \text{ kVA})^2} = 1.720 \text{ kVA} \quad (2)$$

取 1.8 MVA。

3 孤网状态的系统仿真计算分析

3.1 柴油发电机组容量核算

柴油发电机组容量核算主要是用于验证其合理容量, 是否能满足孤网运行要求。

3.1.1 抗台风场景下的柴油发电机组容量核算

1) 全部风机接入孤网

台风期间, 风电场两段母线所连全部风机的偏航负荷均接入, 由柴油发电机组供电。一共 36 台风机, 风机的负荷需求约为 4.19 MW, 远大于柴油发电机组的容量, 即 1.2 MW。无法满足需求。

2) 一半风机接入孤网

台风期间, 假设风电场每段 35 kV 母线所连全部风机的偏航负荷, 轮流由柴油发电机组供电。本项目设两段 35 kV 母线, 考虑约一半容量的风机接入。

每段母线的风机数量为 18 台风机, 风机的负荷需求约为 2.1 MW, 仍然大于柴油发电机组的容量。

为满足偏航电机的启动要求, 需要配置的柴油发电机组的容量很大, 对于本文给定的案例, 柴油发电机组的容量无法满足偏航电机的启动要求, 根据风机厂家提供的防台风策略, 在台风期间, 风机通过锁定桨叶和加强荷载裕度来抵御台风, 并不依靠外部电源。

3.1.2 运行维护场景下的柴油发电机组容量核算

在运维期间, 风电场两段母线所连全部风机的运维负荷, 均接入由柴油发电机组供电。

全部风机的负荷需求约为 540 kW; 同时, 海上升压站的站用电负荷需求为 220 kW。

柴油发电机组的有功容量可满足风机和海上升压站的负荷需求, 但需进行无功过电压的检验。

3.1.3 孤网系统的稳定性分析

在孤网情况下, 需考虑系统的功角稳定、频率稳定和电压稳定。因此, 3.2 节重点分析了柴油发电机的功角、电势和机端电压, 并对系统各风机节点的电压进行了仿真计算。可得, 当 4 串 35 kV 海缆接入孤网且配置 2 Mvar 电抗器时, 柴网发电机能够满足孤网系统的功角稳定、频率稳定和电压稳定要求。

同时, 较小容量的柴油发电机连接长距离 35 kV 集电海缆, 若空载状态下 35 kV 集电海缆充电容量(容性)超过某一数值时, 即可产生自激现象。当电源或负荷中存在某次谐波时, 会造成某次谐波的电压和电流的增大。因此, 需考虑 35 kV 海缆集电线路的距离大小, 避免柴油发电机出现自激磁现象。

在配置 2 Mvar 电抗器情况下, 柴油发电机可最多满足 4 串 35 kV 海缆接入孤网的稳定性要求。

3.1.4 小结

孤网备用电源(即柴油发电机组)的容量, 根据是否考虑抗台风, 会有较大的区别。应结合风机厂家的抗台风策略, 选择合适的容量。

在满足无功过电压情况下, 海上升压站的柴油发电机组容量可为全部风机和海上升压站提供运维电源。

对于本文案例中的配置(如图 1 所示), 将不考虑防台风的应用场景, 以下电气计算和保护配置将根据运维的应用场景来论述。

3.2 潮流计算

潮流计算主要用于在运行维护情景下, 验证柴油发电机组和电抗器容量的选择是否满足孤网运行要求, 以及各节点电压水平是否在允许范围内。

3.2.1 全部风机接入孤网, 且配置 2 Mvar 电抗器

计得, 全部 8 串 35 kV 海缆发出的无功为 3.01 Mvar; 柴油发电机组处于进相运行状态, 需吸收 0.46 Mvar 无功, 发出 0.76 MW 有功。此时, 吸收的无功, 在无功容量极限值的范围内。经计算, 可

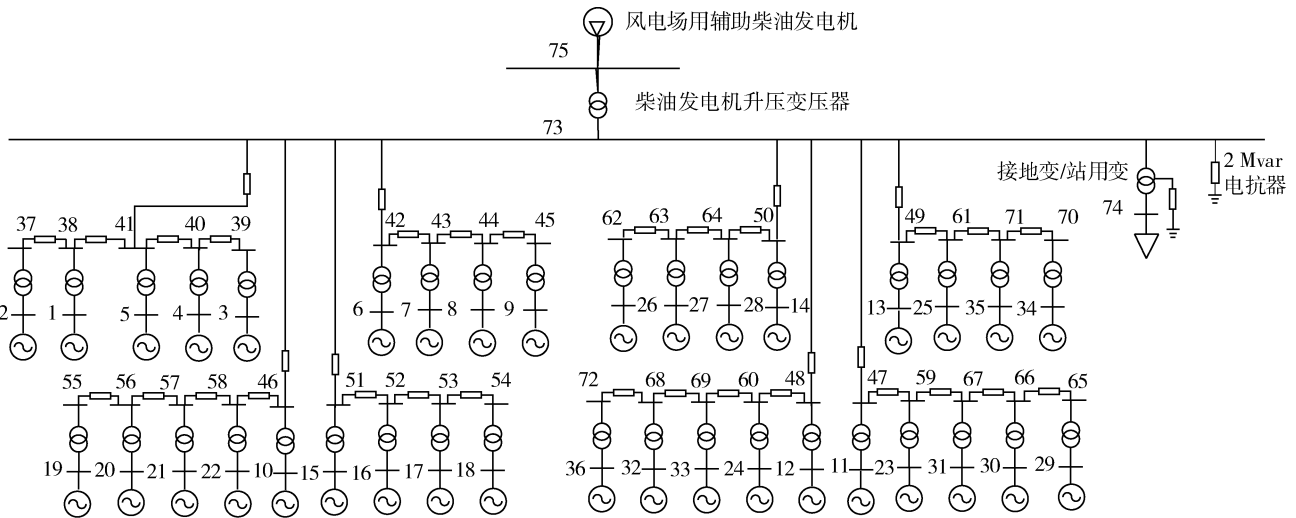


图1 海上风电场孤网状态的仿真等效图

Fig. 1 Simulation equivalent diagram of offshore wind farm during islanded operation

得柴油发电机的功角、电势和机端电压分别为： 80° ，1.4，0.999。在合理的控制策略下，柴油发电机组可稳定进相运行。其中，各风机节点电压区间为 $[0.997\ 0.998]$ 。

柴油发电机组可满足风机和海上升压站的负荷需求和电压需求，并满足35 kV海缆无功需求。但柴油发电机可能会出现自激磁现象。

3.2.2 全部风机接入孤网，不配置2 Mvar电抗器

计得，全部8串35 kV海缆发出的无功为3.06 Mvar；柴油发电机组需吸收2.49 Mvar无功（大于柴发的无功容量极限值），发出0.79 MW有功。其中，各风机节点电压在1.001左右波动。

柴油发电机组可满足风机和海上升压站的负荷需求和电压需求，但无法满足35 kV海缆无功需求。同时，柴油发电机组无法稳定运行。

3.2.3 一半风机接入孤网，且配置2 Mvar电抗器

计得，4串35 kV海缆发出的无功为1.23 Mvar；柴油发电机组需发出1.13 Mvar无功（大于柴发的无功容量极限值），发出0.50 MW有功。柴油发电机组处于过载状态（1.03倍），未超过1.1倍跳闸限值。其中，各风机节点电压在0.993左右波动。

此时，若调节电抗器的-20%无载分接档位，即电抗器容量为1.6 Mvar。调节后柴油发电机组需发出0.72 Mvar无功，发出0.50 MW的有功，各风机节点电压在0.995左右波动。可满足风机

和海上升压站的负荷需求和电压需求，也可满足35 kV海缆无功需求。同时，柴油发电机组可稳定运行。

3.2.4 一半风机接入孤网，不配置2 Mvar电抗器

计得，4串35 kV海缆发出的无功为1.25 Mvar；柴油发电机组需吸收0.90 Mvar无功（等于柴发的无功容量极限值），发出0.49 MW有功。

其中，各风机节点电压在1.001区间波动。因此，基于此工况，柴油发电机组可满足风机和海上升压站的负荷需求和电压需求，可以满足35 kV海缆无功需求。同时，柴油发电机组无法稳定运行。

3.2.5 小结

在一半风机接入孤网且配置2 Mvar电抗器的条件下，柴油发电机组可满足风机和海上升压站的负荷需求和电压需求，也满足35 kV海缆无功需求。同时，柴油发电机组可稳定运行。

3.3 短路电流计算

由3.2节可得，运行维护情景下，分别围绕全部或一半风机接入孤网，且配置2 Mvar电抗器的两种情况下，进行海上风电场短路电流分析。结果如表3和表4所示，可得结论如下：

1) 运行维护情景下，全部或一半风机接入孤网，且配置2 Mvar电抗器的两种情况下，海上风电场短路电流分析结果基本上没有区别。但由于柴油发电机组需考虑其稳定性运行的要求，仅可一半风机接入孤网。

表 3 全部风机接入孤网, 且配置 2 Mvar 电抗器情况下的海上风电场短路电流分析

Tab. 3 Analysis of short-circuit currents of offshore wind farm with all wind turbines and 2 Mvar reactors during islanded operation

短路点	短路点名称	稳态短路电流有效值 / kA			
		单相短路	两相短路	三相短路	两相接地短路
d1	柴油发电机组高压侧	1.484 7	0.879 9	1.016 0	1.633 4
d2	接地变兼站用变低压侧	0.191 4	0.672 3	0.776 3	0.670 6
d3	风机低压侧	0	0.401 0	0.463 1	0.401 0

表 4 一半风机接入孤网, 且配置 2 Mvar 电抗器情况下的海上风电场短路电流分析

Tab. 4 Analysis of short-circuit currents of offshore wind farm with half wind turbines and 2 Mvar reactors during islanded operation

短路点	短路点名称	稳态短路电流有效值 / kA			
		单相短路	两相短路	三相短路	两相接地短路
d1	柴油发电机组高压侧	1.488 7	0.902 0	1.041 6	1.581 3
d2	接地变兼站用变低压侧	0.191 3	0.685 3	0.791 3	0.683 6
d3	风机低压侧	0	0.405 6	0.468 3	0.405 6

2) 柴油发电机组高压侧、接地变兼站用变低压侧、风机低压侧的短路电流都非常小。而此三处的 CT 变比和保护装置是根据额定电流选取, 无法灵敏地反映运行维护情景下的海上风电场短路故障。因此, 由于孤网运行方式下短路电流较小, 在保护整定时需予以额外关注。

3.4 谐波分析

若系统中含有高次谐波时, 并联电抗器投入后, 会产生使系统原有谐波放大的现象。柴油发电机组的短路容量 S_B 是: 166.42 MVA; 并联电抗器的容量 Q_L 分别是 2 Mvar (全部风机接入孤网), 1.6 Mvar (一半风机接入孤网)。

当基波频率为 f_1 时, 则谐振周波数 f_r 为: $f_r = f_1 \sqrt{S_B / Q_L}$ 。求得全部风机接入孤网、一半风机接入孤网时, 对应的谐振次数分别为 9 次谐波、10 次谐波。

1) 一般来说, 柴油发电机组产生的谐波可忽略不计。在运维场景下, 只考虑风机和海上升压站的运维电源 (即加热器和电动机负荷), 造成的谐波污

染较小。在此情况下, 系统的高次谐波极小, 无谐波激励源, 谐振的可能性小。

2) 在抗台风场景下, 需考虑风机的偏航电源。以本文所述 5.5 MW 风机为例, 在偏航期间, 需要通过风机内部的 IGBT 整流模块进行偏航驱动。产生 9 次和 10 次谐波电流百分比分别为: 0.191 2 和 0.190 1。全部风机接入孤网或一半风机接入孤网时, 造成的谐波污染严重。在此情况下, 系统存在高次谐波, 具有一定的谐振可能性。

因此, 从避免谐波谐振的角度, 不推荐柴油发电机组为风机提供偏航电源。

3.5 柴油发电机组保护整定方案

结合海上升压站的正常运行及运维需求, 根据表 3 和表 4 的短路电流计算结果, 对于风电场柴油发电机组的变压器、海上升压站接地变兼站用变, 推荐采用复压过流作为主保护。复压过流保护的电流元件可不考虑变压器的过载能力, 只需按躲过变压器额定负荷电流整定即可 (一般整定为 1.4 倍的额定电流)^[7]。同时, 配置了三段过流保护、高压零序过流保护、低压零序过流保护、外部非电量开入保护、闭锁简易母线保护等保护^[8-9]。

其中, 复合电压元件由 2 个部分组成: 一是负序电压元件, 针对不对称故障; 二是低电压元件, 针对三相对称短路故障。负序电压元件按躲过正常运行时的不平衡电压整定, 一般整定为 0.04 ~ 0.08 倍的系统额定电压, 其灵敏度高, 不会影响变压器保护的灵敏度。低电压元件需躲过电动机启动时系统出现的低电压, 整定值一般应不大于 0.7 倍的系统额定电压。

4 结论

本文对海上风电场孤网状态进行了电气负荷、潮流计算、短路电流计算和谐波分析。结果表明, 对于文中的案例:

1) 额定容量为 1.2 MW 的柴油发电机组, 运行维护场景下, 在一半风机接入孤网且配置 2 Mvar 电抗器的条件下, 柴油发电机组容量可满足风机和海上升压站的负荷需求和电压需求, 也满足 35 kV 海缆无功需求。

2) 柴油发电机组可同时给全部风机和海上升压站提供运维电源, 运行方式简单。由于孤网运行方式下短路电流较小, 在保护整定时需予以额外

关注。

3) 在运维场景下, 只考虑风机和海上升压站的运维电源(即加热器和电动机负荷), 系统的高次谐波极小, 谐振的可能性小。从避免谐波谐振的角度, 不推荐柴油发电机组为风机提供偏航电源。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 风电场工程 110 kV~220 kV 海上升压变电站设计规范: NB/T 31115—2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
National Energy Board. Code for 110 kV~220 kV offshore substation design of wind power projects: NB/T 31115—2017 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海上风力发电场设计规范(送审稿) [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for offshore wind farm (Send review version) [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [3] 中国国家标准化管理委员会. 继电保护和安全自动装置技术规程: GB/T 14285—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
China Standardization Administration of China. Technical code for relaying protection and security automatic equipment: GB/T 14285—2006 [S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
- [4] ARANA I, HERNANDEZ A, THUMM G, et al. Energization of wind turbine transformers with an auxiliary generator in a large offshore wind farm during islanded operation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2792-2800.
- [5] 王楠, 梁伟. 10 kV 小电阻接地系统站用变配置方案研究 [J]. 电力勘测设计, 2014, 10(5): 70-74.
WANG N, LIANG W. Study on station variable configuration scheme of 10 kV low resistance grounding system [J]. Electric Power Survey and Design, 2014, 10(5): 70-74.
- [6] 刘桂林, 马静辉. 变压器后备保护拒动事故原因分析及对策 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 129-133.
LIU G L, MA J H. Cause analysis and countermeasures on transformer backup-protection operation-failure accident [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 129-133.
- [7] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 具有低电压穿越能力的风电接入电力系统继电保护的配合 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 1-6.
ZHANG B H, WANG J, LI G H, et al. Cooperation of relay protection for grid-connected wind power with low-voltage ride-

through capability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 1-6.

- [8] 曾伟忠. 缩短变电站 10 kV 母线短路故障切除时间措施初探 [J]. 继电器, 2007, 35(16): 61-63.
ZENG W Z. Measures to shorten the time of clearing short-circuit faults on 10 kV bus [J]. Relay, 2007, 35(16): 61-63.
- [9] 王建中. 35 kV 简易母线保护动作分析 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 105-107.
WANG J Z. 35 kV simple bus protection action analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 105-107.

作者简介:



郑明

1982-, 男, 湖北仙桃人, 教授级高级工程师, 电气工程硕士, 主要从事火电厂、核电厂和新能源的电气一次设计及设计管理工作(e-mail) zhengming@gedi.com.cn。

ZHENG M



杨源(通信作者)

1990-, 男, 广东湛江人, 工程师, 硕士, 从事海上风电新能源利用研究(e-mail) yangyuan@gedi.com.cn。

YANG Y

沈云

1962-, 男, 广东兴宁市人, 教授级高级工程师, 本科, 主要从事火电厂、核电厂和新能源的电气一次设计(e-mail) shenyun@gedi.com.cn。

徐晓燕

1980-, 女, 贵州, 高级工程师, 硕士, 主要从事火电厂、核电厂和新能源的电气一次设计工作(e-mail) xuxiaoyan2@gedi.com.cn。

陶艳

1994-, 女, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 高压直流输电、电力系统稳定与控制(e-mail) tythevenin@163.com。

(责任编辑 郑文棠)