

海上升压站主变压器冷却方式选择

赵云¹, 郑明², 郑建伟¹

- (1. 中国能建集团装备有限公司 南京技术中心, 南京 210015;
2. 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)

摘要: 由于盐雾腐蚀的原因, 通常将海上升压站电气设备布置在封闭的空间内。但由此带来设备的散热面临巨大挑战, 尤其是散热量最大的主变压器。为此, 对变压器自冷方式在海上升压站所面临的挑战进行分析, 提出了一种变压器闭式循环水冷系统的设计方案。通过对两种方式进行的技术经济比较, 得出了水冷方式比自冷方式更适合海上升压站的结论。

关键词: 海上升压站; 变压器; 冷却

中图分类号: TM401

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0091-04

Selection of Main Transformer Cooling System in Offshore Substation

ZHAO Yun¹, ZHENG Ming², ZHENG Jianwei¹

- (1. Nanjing Technology Center of China Energy Equipment Company Co., Ltd., Nanjing 210015, China;
2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: As salt mist corrosion, electrical equipments of the offshore substation are usually arranged in an enclosed space. However, it will bring great challenges for the cooling of equipments, especially the main transformers which have the most quantity of heat. This paper analyses the challenges for the ONAN transformers in the offshore substation, and gives a design of the closed cycle water cooling system for the transformer. By the comparison in technology and economy of the two schemes, the conclusion shows that the OFWF transformer is more suitable than ONAN transformer for offshore substation.

Key words: offshore substation; transformer; cooling

随着化石能源的巨大消耗和环境的严重污染, 可再生能源越来越受到世界各国的关注, 风能成为最具竞争力的新能源之一。相比陆上风电, 海上风电不仅不占用土地资源, 而且能量丰富、出力稳定、利用率高, 已经成为世界风电发展的新方向。

从目前规划的海上风电项目来看, 风电场容量一般在 200~300 MW, 离岸距离都在 10 km 以上。对于这样的规模和离岸距离, 需要建造海上升压站, 将电压抬升至 110 kV 或 220 kV 后, 通过高压海底电缆输送至大陆电网。

海上升压站是海上风电场电力输送的关键设

施, 其安全稳定运行是海上风电场安全运行的重要保障^[1-4]。

1 海上升压站电气设备面临的挑战

海洋大气环境具有高湿度、高盐分的特点, 这给海上升压站电气设备的防腐和绝缘带来了巨大挑战^[5]。

1.1 对防腐的影响

海洋大气湿度大, 易在钢表面形成水膜; 海洋大气盐分多, 它们积存在钢表面与水膜一起形成导电良好的液膜电介质, 是电化学腐蚀的有利条件, 海洋大气相比内陆大气, 对钢的腐蚀程度要高 4~5 倍^[6]。

1.2 对绝缘的影响

盐分附着在绝缘件(如绝缘套管)表面并不断积

累,使得绝缘件表面的污秽程度增加,从而需要电力设备具有更大的爬电比距。海洋大气环境所对应的污秽等级为IV级,在该污秽等级下,电力设备的爬电比距至少应达到3.1 cm/kV。

1.3 应对措施

为了应对海洋大气对电气设备的影响,一方面需要提高设备的防腐和绝缘性能,如:设备的表面采用海洋重防腐的涂料防腐体系,采用高污秽等级的绝缘设备。另一方面需要将设备布置在封闭的房间内,并对内部空气进行盐雾过滤,以改善电气设备的工作环境。类似的做法在海上石油平台已经得到广泛的应用,例如设置电气设备间,将开关柜、控制设备等布置在房间内,通过通风系统或空调系统实现设备的冷却等。与石油平台中的电气设备相比,海上升压站主变压器的散热量要大得多,采用通风系统对设备进行散热冷却是否仍是最佳方案还有待验证。

本文参考海上石油平台采用的一种闭式海水冷却系统^[7],提出了海上升压站主变压器水冷技术方案,综合分析了海上升压站采用自冷和水冷两种方案的技术经济差异。

2 主变压器参数

以广东省某200 MW海上风电场为例,海上升压子设两台主变压器,主变参数如下:

- 1) 产品型号: SZ11-110000/110, 三相、有载调压、双线圈铜绕组、低损耗、低噪音、自然冷却、油浸变压器。
- 2) 额定容量: 110 000 kVA/110 000 kVA。
- 3) 额定电压及其组合: $(121 \pm 8) \times 1.25\% / 35$ kV。
- 4) 额定频率: 50 Hz。
- 5) 调压方式: 高压中性点带负荷调压。
- 6) 联结组别: YN、d11。
- 7) 阻抗电压: $U = 10.5\%$ 。
- 8) 冷却方式: ONAN(油浸自冷)。
- 9) 耐热等级: A级。
- 10) 空载损耗: < 85 kW, 空载电流 $< 0.34\%$ 。
- 11) 负载损耗: < 350 kW。

2.1 主变散热量

主变散热功率等于空载损耗加上负载损耗,根据以上主变参数,主变最大散热功率为435 kW。

3 自冷方案

两台主变分别布置在10 m × 10 m × 10 m的主变室内,散热器本体布置。主变室采用全封闭型式,每个主变室设一套独立的通风系统,采用自然进风、机械排风方式,实现主变室散热和换气要求。

变压器散热器布置于本体两侧,总的外形尺寸为4 500 mm × 2 600 mm × 3 600 mm,含油重量约16.5 t,其中油重4.2 t。

3.1 通风量计算

在不考虑主变室隔墙散热量的情况下,主变的散热量将全部通过主变室的通风系统排出。通风量按式(1)计算:

$$G = \frac{Q}{\alpha c_p (t_p - t_{wf})} \quad (1)$$

式中: G ——通风量, kg/h; Q ——散热量, W; c_p ——空气的定压比热容, kJ/kg°C, 取值 $c_p = 1$; α ——单位换算系数, 取值 $\alpha = 0.28$; t_p ——排气温度, °C, 对于油浸式变压器, 主变室排气温度取 $t_p = 45$ °C; t_{wf} ——夏季室外计算温度, °C, 按历年最热月最高气温平均值选取, 取值 $t_{wf} = 35$ °C^[8]。

将2.1节得到的散热量代入式(1), 经计算, 通风量 $G = 155\,357$ kg/h。按35°C、101.3 kPa状态的空气密度换算, 得到按体积计算的通风量 $V = 135\,093$ m³/h。

3.2 通风设备选型

由于海洋大气中的盐雾会对设备造成腐蚀, 因此, 在进风系统中增加了盐雾过滤装置, 使得送风系统的风阻增大。根据海上石油平台的工程经验, 过滤器风阻通常不大于320 Pa^[9]。

排风采用轴流风机, 按N+1原则进行配置, 共设5台轴流风机, 4用1备。每台风机的风量应不小于 $135\,093/4 = 33\,773$ m³/h, 风压按不小于320 Pa选取。

排风机选型为: No. 8机型轴流风机; 风量: 34 073 m³/h; 全压: 388 Pa; 电机功率: 5.5 kW; 通风系统总的运行功率: $P = 4 \times 5.5$ kW = 22 kW。

4 水冷方案

水冷变压器主要应用于水电站的发电机主变压器, 三峡水电站工程采用的即是水冷变压器^[10]。

海上平台也有一些采用海水进行设备冷却的案例, 例如水冷柴油发电机组。

4.1 开环水冷系统

不管是水电站的水冷变压器、还是海上平台的水冷发电机组, 采用的都是开环水冷系统。水冷变压器的冷却水取自上游水库, 江水经过滤后流入油水冷却器, 与变压器油进行热交换, 热水直接排入下游江中。海上大型柴油发电机组通常采用海水冷却的方法, 海水经过滤后, 直接流过柴油机组, 将热量带走, 排入大海。

开环水冷系统能够保证冷却效果, 但对水质要求较高, 需要一套过滤装置, 而且需定期排沙除垢、清理管道。海水管道还面临海水腐蚀和海生物侵蚀的问题, 对设备和管道在材质和防腐上都有非常高的要求, 而且需经常维修和清理, 维护成本比较高。

4.2 闭式循环水冷系统

考虑到海水冷却系统的诸多问题及海上平台淡水资源的紧缺, 海上升压站主变水冷系统采用闭式循环水冷系统^[11]。闭式循环水冷系统由油水冷却器、油泵、油管、水泵、水管、水箱、及阀门组成, 工作原理如图1所示。油水冷却器、潜油泵用油管及阀门与变压器油箱相连, 形成油路强迫循环。冷却水与变压器油在油水冷却器中进行热交换。油水冷却器、水泵、水箱与换热器用水管和阀门相连, 形成冷却水的闭式循环。冷却水流过置于海水中的换热器, 与海水的换热后返回平台上的水箱。出于可靠性考虑和检修需要, 油水冷却器和水泵均采用N+1原则配置。水箱用以补充因检修或泄漏造成的冷却水损失, 而维持水箱有一定的储水量, 则可为运维争取时间, 避免因冷却水不足造成变压器停用。

闭式循环水冷系统相比开环海水冷却系统具有以下优势:

- 1) 使平台上的设备隔绝了海水的侵蚀, 使腐蚀、海生物、泥沙冲刷等问题得到根本解决。
- 2) 用淡水作为循环冷却介质, 降低了对设备和管道材质的要求, 可降低设备造价。
- 3) 变管道内部防腐涂装为换热器和管道外部防腐, 降低了涂装的技术难度。
- 4) 降低了海水渗入绝缘油带来的安全风险。
- 5) 无需定期清理过滤装置和管道, 降低了维护成本。

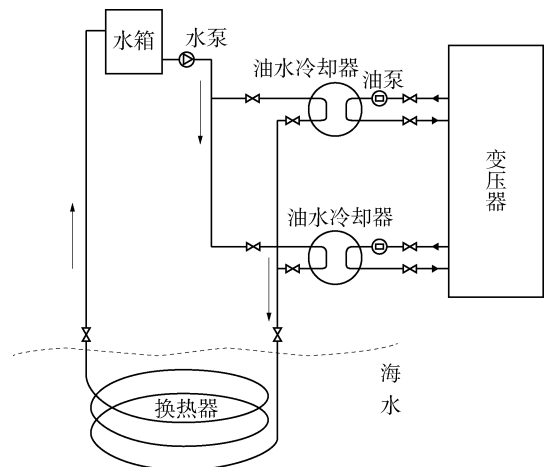


图1 变压器闭式循环水冷系统原理图

Fig. 1 Principle Diagram of Closed Cycle Water Cooling System for Transformer

4.3 水冷设备选型

两台主变分别配一套型号为 YSF-250×3 的油水冷却装置, 每套装置包含 3 台油水冷却器, 2 用 1 备, 最大冷却功率为 750 kW, 额定冷却功率为 500 kW, 可满足冷却器维护检修的需要。

单台油水冷却器的技术参数如下: 额定冷却容量 250 kW; 额定水流量 28 m³/h; 额定油流量 80 m³/h; 额定入口油温 70℃; 额定入口水温 30℃; 油泵电机功率 3 kW; 单台质量 1 120 kg; 充油量 250 kg。

3 台油水冷却器总的外形尺寸为: 3 300 mm×1 200 mm×2 670 mm, 总质量为 4.11 t, 其中油质量 0.75 t。

冷却水泵的流量按 2 台油水冷却器总水量设计、扬程按变压器平台与最低潮位间的落差设计。

冷却水泵的参数如下: 额定流量 60 m³/h; 扬程 15 m; 电机额定功率 4 kW。

主变室考虑换气和事故排烟的需要, 设两台排风机, 一用一备。通风系统同样需要盐雾过滤, 排风机风量按主变室每小时换气不小于 12 次选择。

排风机选型: No. 8 机型混流式消防高温排烟风机; 风量 12 657 m³/h; 全压 342 Pa; 电机功率 2.2 kW。

整个冷却系统总的运行负荷为: $P = 3 \times 2 + 4 + 2.2 = 12.2$ kW。

5 两种方案的对比

下文将从安全性、冷却效果、可靠性、运行维护、经济性和设备防腐几个方面对两种方案进行对比。

5.1 安全性

海上变电站的安全性是设计者首先要考虑的问题,特别是对火灾风险的降低。水冷变压器的充油量比自冷变压器要小得多,在发生变压器火灾时,其火灾后果也相对较小。在以往的水冷变压器使用过程中,发生过水冷系统堵塞及泄漏的问题,给变压器的安全运行带来威胁。采用闭式循环水冷系统则很好的解决了这些问题,再辅以水质及油质的监测系统,可以很好的保证其安全性。因此,在安全性方面,闭式循环水冷系统具有很好的优势。

5.2 冷却效果

自冷变压器将所有热量散至主变室,通过主变室的通风系统将热量带走,主变室的温度受外部气温的影响较大。水冷变压器大部分热量通过冷却水排至海水中,冷却效果主要受海水温度影响。海水温度的波动比空气温度小,因此,从冷却效果上看,两者都可以满足要求,但水冷方式冷却效果更稳定。

5.3 可靠性和运行维护

自冷变压器相比水冷变压器结构简单,没有油泵、水泵、换热器和阀门等设备,可靠性高,维护量小,但主变室通风系统需要维护,空气过滤器需定期更换。水冷变压器需要设置至少一台备用的油冷却器,以保证整体可靠性。闭式循环冷却系统可以从根本上解决海水腐蚀和海生物侵蚀的问题。

5.4 经济性

海上升压站采用自冷变压器和水冷变压器的经济性对比如下:

表1 变压器自冷与水冷方式的经济性比较

Table 1 Economic Compare Between ONAN and OFAF

项目	Transformers			
	自冷方式		水冷方式	
	单台	整站	单台	整站
冷却装置成本	8	16	22	44
充油成本	4.64	9.28	0.83	1.66
平台结构成本		0		-11
固定投资		25.28		34.66
年运行成本	10.56	21.12	5.86	11.72

注:年运行小时数按6 000 h计,度电成本按0.8元/kWh。

水冷方式系统设备固定投资成本比自冷方式更大,但运行费用更低,而且水冷方式可以减少变压器油的使用。值得关注的一点是,水冷方式的尺寸和重量自冷方式相比要小得多,这对于平台结构的

影响是比较大的,可以使平台面积减少近5%,重量减少13 t。对于更大容量的变压器,水冷方式在尺寸和重量方面的优势将体现的更加明显。

5.5 设备防腐

在设备防腐方面,两种系统都已考虑了主变室通风系统的盐雾过滤,所以变压器防腐效果相差不多。水冷系统有换热器置于海水中,部分水管暴露在含盐空气中,换热器和管道的外壁需作防腐,但技术都已成熟。

5.6 环境影响

自冷变压器本身噪音很小,主要是变压器本体噪音。但主变室通风系统采用了大风量风机,运行噪音很大,单台风机噪音在85 dB左右,而且需多台同时运行。水冷系统油泵、水泵的运行噪音很小,主变室通风系统减少了风机数量和通风量,噪音在75 dB左右。

5.7 对比结果

综上所述,两种冷却方式都能满足变压器的散热需要,水冷变压器在安全性、冷却效果、经济性和环境影响方面要优于自冷变压器,自冷变压器在可靠性和运行维护方面稍具优势,综合技术经济对比,推荐海上升压站主变压器采用水冷方式。

以上对比分析结果是基于变压器全室内布置得出的,如果将散热器室外布置,可以大幅降低主变室的通风量,在冷却效果、经济性和降噪方面会有比较大的提升,但需要考虑散热器防腐、消防、排水(可能含油)等问题。

散热器室外布置与水冷方式的技术经济对比还有待进一步论证。从总体趋势来看,散热量越大,水冷优势越明显。特别是当平台上有多台散热量大的设备,可以统筹考虑这些设备的散热,水冷系统具有更好的经济性,这在海上平台和海上换流站中都有所体现。

6 结论

本文基于某海上风电项目的主变压器参数,对ONAN和OFWF两种变压器冷却方式进行了分析和计算,提出了一种闭式循环水冷系统,从安全性、冷却效果、可靠性、运行维护、经济性、设备防腐和环境影响方面对两种方案进行了对比,得出水冷变压器比自冷变压器更适合海上升压站的结论。

(下转第100页 Continued on Page 100)

新技术,新工艺,同时国土资源越来越稀缺,环境要求越来越高,传统敞开式布置将越来越受限制,电力枢纽建设将会朝集约式绿色化发展,全户内站将成为趋势,但以往简单的混凝土结构已经不能满足复杂全户内站设计要求,依据本工程建设经验,以及本文的技术经济分析,S-RC混合结构具有受力明确,工艺适应性强,造价经济的优势,在今后的电力建设中值得优先考虑选用。

参考文献:

- [1] 汪大绥,周建龙.我国高层建筑S-RC混合结构发展与展望[J].建筑结构学报,2010,31(6):62-70.
WANG Dasui, ZHOU Jianlong. Development and Prospect of Hybrid High-rise Building Structures in China [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 62-70.
- [2] 黄宇星,祝磊,张艳霞.钢-混凝土混合结构研究综述[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第13届(ISSF-

2012)学术交流会暨教学研讨会论文集,武汉,2012.

- [3] 唐蓉琴,黄勇.钢桁架-混凝土板组合屋盖结构静力特性研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2013,30(5):104-125.
TANG Rongqin, HUANG Yong. The Static Study on Steel Truss Concrete Slab Composite Structure [J]. Journal of Guizhou University(Natural Science), 2013, 30(5): 104-125.
- [4] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings [S].
- [5] 陈传新,王静,朱功辉,等.±800 kV换流站阀厅和主控楼结构选型[J].南方电网技术,2009,3(5):10-14.
CHEN Chuanxin, WANG Jing, ZHU Gonghui, et al. Structure Form Selection of the Valve Hall and Control Building of ±800 kV DC Converter Station [J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(5): 10-14.

(责任编辑 张春文)

(上接第94页 Continued from Page 94)

参考文献:

- [1] 史磊.海上升压站设备冷却技术研究[D].广州:华南理工大学,2012.
SHI Lei. Cooling System Study for Transformer Substation of Offshore Wind Power Station [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [2] 陈敏,余双翔,刘小松,等.基于LCC的海上风电场主变压器冗余配置经济性对比与分析[J].电力系统自动化,2015,39(14):168-174.
CHEN Min, SHE Shuangxiang, LIU Xiaosong, et al. Economical Assessment on Redundancy Configuration of Main Transformers for Offshore Wind Farm Based on Life Cycle Cost [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 168-174.
- [3] 闫培丽,袁兆祥,齐立忠,等.海上风电场二次系统设计关键技术[J].电力建设,2015,36(4):129-133.
YAN Peili, YUAN Zhaoxiang, QI Lizhong, et al. Key Technology of Offshore Wind Farm Secondary System Design [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(4): 129-133.
- [4] 张明,张哲,叶军.海上风电场升压平台布置研究初探[J].上海节能,2015(2):80-84.
ZHANG Ming, ZHANG Zhe, YE Jun. Research On Boost Platform Layout on Offshore Wind Farm [J]. Shanghai Energy Conservation, 2015(2): 80-84.
- [5] 施群.海上平台高压开关装置的研究[D].合肥:合肥工业

大学,2003.

- SHI Qun. Study of High Voltage Switchgear for Offshore Platform [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003.
- [6] 刘新.海上风电场的防腐涂装[J].材料保护,2011,44(4):20-23.
LIU Xin. Anticorrosive Coating of Offshore Wind Farms [J]. Materials Protection, 2011, 44(4): 20-23.
- [7] 王胜.海上生产装置闭式循环冷却系统[J].中国造船,2007(11):13-15.
WANG Sheng. Closed Cycle Cooling System for Offshore Production Device [J]. SHIPBUILDING OF CHINA, 2007(11): 13-15.
- [8] QHS300—2003,海上平台暖通空调系统设计方法[S].
- [9] 李佰贵,宋建伏.除盐雾空气净化装置在海洋钻井平台上的应用[J].中国修船,2012(6):43-44.
LI Baigui, SONG Jianfu. Salt Fog Releasing and Air Filtrating Equipment Used on Drilling Platform [J]. CHINA SHIPREPAIR, 2012(6): 43-44.
- [10] 王华军,邵国华.三峡水电站主变压器冷却方式的选择[J].人民长江,2009(1):67-68,104.
WANG Huajun, TAI Guohua. Selection of Main Transformer Cooling Method of Three Gorges Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2009(1): 67-68, 104.
- [11] 广东省电力设计研究院.用于海上风电场升压站的降温冷却系统:CN 202523989 U[P].2012-11-07.

(责任编辑 高春萌)