

海上升压站用 220 kV 酯油变压器选型与优化设计研究

杨建军¹, 杨国泰², 蔡胜伟², 张亚旭³, 汪天呈¹, 杨凯⁴, 应斯²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074; 3. 西门子能源变压器(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430050; 4. 国网物资有限公司, 北京 100120)

摘要:天然酯绝缘油和合成酯绝缘油由于具有生态友好、防火性能优异的特点,在变压器行业得到越来越多的应用。目前,国内还没有环保酯类绝缘油应用于海上升压站 220 kV 电力变压器的先例。本文根据海上升压站特点与要求对变压器酯油类型和绝缘系统类型进行选型研究,以 SZ-150000/220 型变压器为对象,建立变压器器身结构改进模型进行仿真分析,仿真验证结果表明酯类绝缘油满足 220 kV 变压器的绝缘和温升要求。本文通过对比分析和仿真计算探讨了酯类绝缘油用于海上升压站 220 kV 电力变压器的可行性,并提出优化设计方案使设备适应海上运行环境要求,为酯油变压器在海上升压站的应用提供了参考。

关键词:海上升压站;酯油变压器;环保;优化设计

中图分类号: TM411 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.05.010

Selection and optimization design of 220 kV ester oil transformer for offshore substation

YANG Jianjun¹, YANG Guotai², CAI Shengwei², ZHANG Yaxu³,
WANG Tiancheng¹, YANG Kai⁴, YING Si²

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China;
2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
3. Siemens Energy Transformer (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430050, China;
4. State Grid Corporation of China, Beijing 100120, China)

Abstract: Natural ester and synthetic ester insulating oils are getting more and more application in transformer industry because of their eco-friendly and excellent fire resistance characteristics. At present, there is no precedent in China for the application of environment friendly ester insulating oil in 220 kV power transformers for offshore substation. According to the characteristics and requirements of offshore substation, the selection of transformer ester oil types and insulation system types were studied in this paper. Taking SZ-150000/220 type transformer as the object, an improved model of the transformer body structure was established for simulation analysis, and the simulation results show that the ester insulating oil meet the requirements of insulation and temperature rise of 220 kV power transformer. The feasibility of ester insulating oil applied in 220 kV power transformer for offshore substation was discussed through comparative analysis and simulation calculation, and an optimized design scheme was proposed to make the equipment adapt the requirements of offshore operating environment, which provides a reference for the application of ester oil transformer in offshore substation.

Key words: offshore substation; ester oil transformer; environmentally friendly; optimization design

0 引言

欧洲从 20 世纪 90 年代开始发展海上风电,截至目前海上升压站已经经历了三代技术演变。从第一代千吨级单台主变升压站,到 2010 年前后发展为多台主变的第二代海上升压站,当前第三代海上

升压站为万吨级柔性直流换流站^[1]。我国海上升压站发展起步较晚,但近年来发展势头迅猛,目前已完成柔性直流换流站建设,实现了海上升压站的跨代发展^[2-3]。随着我国“双碳”战略的实施和新型电力系统的建设,我国海上风电装机容量将进一步增加。由于近海区域受航道、海域空间等限制因素影响较大,而远海区域面积大、风资源好,海上风电走向深远海是必然趋势,由此带来的海上升压站建设

基金项目:中国电力科学研究院有限公司横向资金项目(SZW11202201777)。

和运行的经济性、环保性、可靠性等问题日益凸显。

海上升压站既是电力工程,也是海洋工程,输电技术涉及的相关问题比较复杂,既要考虑电力系统运行的可靠性和稳定性,又要考虑海上环境的特点^[4-5]。随着海上风电装机规模逐渐扩大,海上升压站设备的环保、防火性能以及运行可靠性等因素越来越受到关注。酯油变压器在陆上变电站已经有大量应用,其环保、防火性能、耐老化和过负荷能力都得到了很好的验证^[6-12]。海上升压站所处的海洋环境特点及其环保化、高集成小型化的发展趋势,使得酯油变压器在海上升压站的应用具有重要的经济价值和社会效益。

近年来,国内外学者对海上升压站变压器的研究主要集中在变压器的设计选型研究、性能分析和可靠性研究等方面,提出了海上升压站变电站设计的基本要求,得到了海上升压站最优的散热方式、绕组结构等^[13-15]。傅春翔等^[16]提出了海上升压站大孤岛运行模式和设备配置方案,为海上风电场的可靠运行提供指导方案,但该方案增加了系统复杂度,增加了设备建设和维护成本,缺乏对设备本身运行可靠性的分析。杨建军等^[17]提出了海上升压站变压器设计的基本要求,为海上升压站防腐、防火、环保、运行可靠性等方面提供指导,但未具体分析提高海上升压站变压器可靠性的方法。目前,国内还没有环保酯类绝缘油应用于海上升压站220 kV电力变压器的先例,对其应用可行性以及采用酯油变压器提高海上升压站的环保水平、运行可靠性、运行寿命等问题有待进一步研究。

本文根据海上升压站特点与要求对变压器所用酯油类型和绝缘系统类型进行选型研究,并以一台SZ-150000/220型酯油变压器为对象进行电磁场、温度场仿真分析,通过对比分析与仿真计算结果提出变压器的优化设计方案,为220 kV酯油变压器在海上升压站的应用提供技术参考。

1 海上升压站特点与要求

海上升压站具有以下4个显著特点:一是需耐受盐雾、高温、高湿、台风等特殊海洋环境;二是环保要求高,如采用普通矿物油,发生泄漏会危害海洋生态;三是海上升压站离岸远,运输不便,导致安装、运维成本高,可靠性要求高;四是体积受限、空间封闭,防火安全性要求高。因此,海上升压站在设计制造时需考虑设备的运行环境、环保要求,以及运行维护和安装运输的特点,从而对其进行针对性的设计与处理。海上升压站典型图如图1所示。



图1 海上升压站典型图

Fig.1 Typical diagram of offshore substation

目前我国海上升压站全部采用矿物绝缘油变压器,矿物绝缘油环保性较差、闪点(燃点)低、防火安全性较差,对海上升压站紧凑型平台的消防要求极高。随着国家“双碳”战略的提出,在绿色发展理念指导下,提升海上升压站电气设备的环保水平并保证设备的安全性以及运行可靠性具有重要意义。

与陆上变电站相比,海上升压站的海上环境对所使用的设备有防盐雾、防湿热、防生物霉菌等“三防”要求,在部分地区还有抗强台风和狂浪以及抵抗高紫外线辐射的要求,这些特殊的运行环境对海上风电场电气设备提出了严格的防护要求。在变压器设计过程中,防腐、密封与散热的处理是需要重点考虑的问题。

2 变压器选型研究

2.1 酯油选型研究

酯油分为天然酯和合成酯,相对于矿物绝缘油变压器,酯油变压器在环保、防火性能上有明显优势。天然酯和合成酯绝缘油的分子结构不同,导致两种绝缘油在防火性能、降解率、氧化安定性等方面存在差异,使得采用相应绝缘油的变压器在火灾危险等级、环保性能等级、后期维护等方面不尽相同^[18-19]。因此,根据海上升压站的需求和特点对天然酯和合成酯绝缘油进行选型研究具有重要意义。3种绝缘油典型的性能参数如表1所示。

天然酯与合成酯绝缘油的典型性能对比分析如下:

(1)氧化安定性方面,合成酯绝缘油的氧化安定性更好,在免维护方面展现出更多优势。天然酯绝缘油在密封条件下可改善其氧化稳定性,因此针对采用天然酯绝缘油的变压器可通过添加抗氧化剂、采取密封结构、减少露空时间等方法来提高其氧化安定性。

(2)环保性方面,天然酯绝缘油和合成酯绝缘油的28天降解率分别为97%、89%,在环保性方面

表1 3种绝缘油典型性能参数

Tab.1 Typical performance parameters of three insulating oils

参数	矿物	天然酯	合成酯
	绝缘油	绝缘油	绝缘油
密度(20℃)/(g/cm ³)	0.88	0.92	0.97
比热容(20℃)/(J/(kg·K))	1 860	1 848	1 880
热导率(20℃)/(W/(m·K))	0.126	0.177	0.144
运动黏度(20℃)/(mm ² /s)	22	85	70
运动黏度(100℃)/(mm ² /s)	2.6	8.4	5.3
物理性能			
倾点/℃	-50	-20	-60
膨胀系数/(×10 ⁻³ K ⁻¹)	0.75	0.74	0.75
闪点/℃	150	316	260
燃点/℃	170	360	316
28天降解率(OECD 301 F)/%	不降解	97	89
火灾危险等级(IEC 61100)	O1	K2	K3
化学性能			
腐蚀性硫	—	非腐蚀性	
酸值/(mgKOH/g)	≤0.01	≤0.03	≤0.03
净热值/(MJ/kg)	46.0	37.5	31.6
PCB含量/(mg/L)	—	检测不出	
电气性能			
击穿电压/kV	70	75	75
介质损耗因数(90℃)/%	0.2	0.3	0.8
介电常数	2.2	3.1	3.2

天然酯绝缘油优于合成酯绝缘油。

(3)防火安全性方面,天然酯绝缘油的闪点和燃点显著高于合成酯绝缘油,天然酯绝缘油的防火安全性更高。

海上升压站用变压器的酯油选型可根据工程具体环境和需求决定,结合陆上酯油变压器和海上升压站的运行维护经验,酯油变压器的相应性能、使用寿命、可靠性可通过针对性的结构设计与辅助系统设计等辅助手段进行加强。从绿色低碳、防火安全角度考虑,优选天然酯绝缘油;从绝缘油的氧化安定性等角度考虑,则优选合成酯绝缘油。

2.2 酯油变压器绝缘系统的应用分析

酯油的耐热等级为130级(B),其与不同耐热等级的固体绝缘材料组合可以组成不同类型的绝缘系统,以适应变压器不同的温升限值和负载能力。

JB/T 13749—2020《天然酯绝缘油电力变压器》参考GB/T 1094.14—2022《电力变压器 第14部分 采用高温绝缘材料的液浸式电力变压器》的绝缘系统划分方式,并考虑技术经济性和应用需求,将天然酯绝缘油电力变压器常用绝缘系统划分成I类绝缘组合、II类绝缘组合和III类绝缘组合^[20],分别对应GB/T 1094.14—2022中的常规绝缘系统、混合绝缘系统中的半混合绝缘绕组组合和高温绝缘系统。天然酯绝缘油和合成酯绝缘油都归类为酯类绝缘

油,其耐热等级和绝缘系统的划分一致,因此,JB/T 13749—2020划分的3类绝缘组合也适用于合成酯绝缘油。酯油变压器常用绝缘组合的比较如表2所示。

表2 酯油变压器常用绝缘组合的比较

Tab.2 Comparison of common insulation combination for ester oil transformers

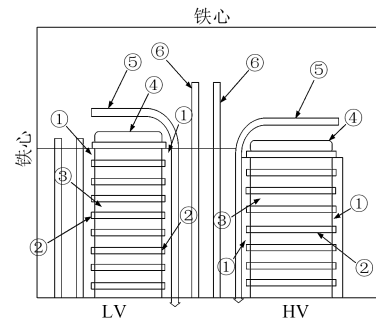
项目	I类绝	II类绝	III类绝
	缘组合	缘组合	缘组合
导线绝缘	C	H	H
绝缘件类型			
垫块/撑条	C	C	H
绝缘隔板	C	C	H
顶层油温升	C	C	H
绝缘件应用温度			
绕组平均温升	C	H	H
绕组热点温升	C	H	H

注:C表示常规绝缘系统,H表示高温绝缘系统。

2.3 3类绝缘组合(绕组)的比较和具体说明

2.3.1 I类绝缘组合

I类绝缘组合是由酯油替换矿物绝缘油,其他绝缘材料均使用105级(A)绝缘材料构成。采用常规绝缘系统的酯油变压器适用于现行常规油浸式电力变压器应用场合。海上升压站用变压器采用酯油替代矿物绝缘油可提高变压器设备的防火安全性和环保水平。I类绝缘组合示例如图2所示。



LV—低压; HV—高压; ①—绕组轴向撑条; ②—径向垫块; ③—导线绝缘; ④—静电屏蔽环; ⑤—角环; ⑥—隔板

图2 I类绝缘组合示意图

Fig.2 Schematic diagram of class I insulation combination

2.3.2 II类绝缘组合

II类绝缘组合的绝缘油采用酯油,绕组导线以及层式绕组的层间绝缘采用耐温等级为120级(E)及以上的绝缘材料,在其他部件采用常规绝缘材料。采用II类绝缘组合的酯油变压器适用于峰谷偏差大、三相不平衡率偏高或有短时过负载运行的场合。对变压器体积、质量或尺寸等受限的场合,也可选用II类绝缘组合的酯油变压器,且从变压器高温绝缘材料成本和变压器温升性能等方面综合

比较,选用II类绝缘组合更有优势。II类绝缘组合的绕组平均温升和热点温升均高于I类绝缘组合,由此可实现海上升压站变压器的紧凑型设计。II类绝缘组合的示例如图3所示。

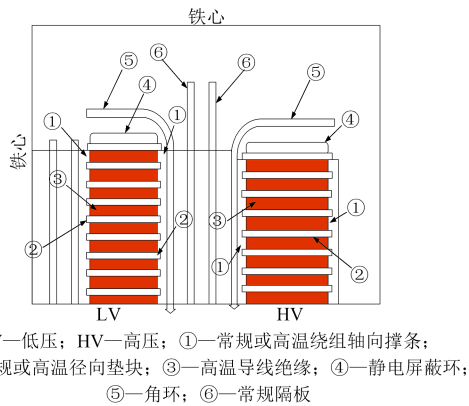


图3 II类绝缘组合结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of class II insulation combination

2.3.3 III类绝缘组合

III类绝缘组合的绝缘油采用酯油,绕组各个部位均采用耐温等级为130级(B)及以上的绝缘材料。当应用场景对变压器体积、质量或尺寸等要求较高,且常规绝缘系统或混合绝缘系统无法满足要求时,应选用高温绝缘系统。III类绝缘组合可最大限度地发挥酯油的耐热性能,其温升限值高于II类绝缘组合。III类绝缘组合的示例如图4所示。

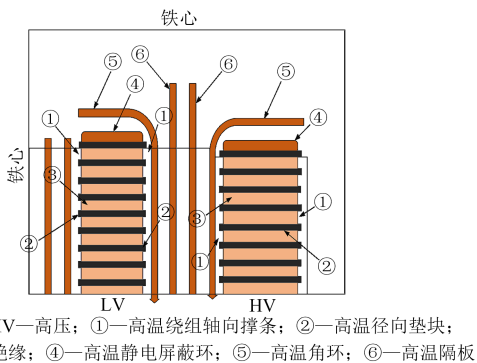


图4 III类绝缘组合结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of class III insulation combination

2.3.4 温升限值

不同绝缘组合酯油变压器的温升限值如表3所示。

由于海上升压站用酯油变压器应用II类和III类绝缘组合的目的仅在于实现其整体的结构紧凑而非追求较高的温升限值。因此,设计人员可综合各种因素来决定主变压器应用绝缘系统的组合类型。由于海上升压站对变压器的体积、质量、尺寸等有严格限制,为了满足海上升压站应用的环保

表3 不同绝缘组合的温升限值
Tab.3 Temperature rise limit of different insulation combination

项目	I类绝缘组合	II类绝缘组合	III类绝缘组合
固体绝缘耐热等级最低要求	105级(A)	120级(E)	130级(B)
顶层液体温升/K	60	60	85
绕组平均温升/K	65	75	85
固体绝缘的热点温升/K	78	90	100

化、小型化需求,提升变压器的可靠性,建议采用II类和III类绝缘组合来提高变压器的温升限值,减小变压器的体积和质量。

3 海上升压站用220 kV酯油变压器的仿真分析

以采用I类绝缘组合的220 kV酯油变压器为研究对象,考虑酯油运动黏度等因素对变压器散热能力的影响,对变压器器身进行改进设计,并建立模型对海上升压站用220 kV酯油变压器的绝缘结构和温度场进行仿真分析。

3.1 绝缘结构仿真

绝缘结构仿真以电压等级为220 kV/36.75 kV、容量为150 MVA、调压方式为 $\pm 8 \times 1.25\%$ 的电力变压器为例,其绝缘水平参数如表4所示,其中HV为高压端、HVN为高压中性点、LV为低压端。

表4 绝缘水平参数
Tab.4 Insulation level parameter

绕组端子(单位)	设备最高电压 U_m /kV	操作冲击耐受电压 U_{sr} /kV	雷电全波冲击耐受电压 U_{LI} /kV	雷电截波冲击耐受电压 U_{LIC} /kV	交流耐受电压 U_{AC} /kV
HV	252	750	950	1 050	395
HVN	126	—	400	—	200
LV	40.5	—	200	220	85

为减小由于酯油运动黏度大对变压器散热带来的负面影响,本研究加大了部分变压器器身主绝缘油道,将影响散热的油道尺寸增大20%~30%。变压器主绝缘电场简化计算模型如图5所示。

本研究基于天然酯绝缘油进行仿真计算,使用边界元电场仿真软件对变压器绝缘结构在工频电压 $U_{AC}(1 \text{ min})$ 下的电场进行分析。为了简化计算,按线性稳态轴旋转场进行计算。酯油的相对介电常数取3.2,油中绝缘纸和绝缘纸板的相对介电常数分别取3.9和4.9。图5中的高压绕组和静电环为高电位($U_{AC}=395 \text{ kV}$)一类边界条件;铁心、铁轭及低

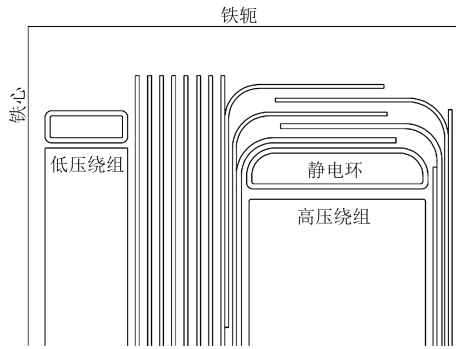


图5 变压器主绝缘电场简化计算模型

Fig.5 Simplified calculation model of main insulation electric field of transformer

压绕组为地电位一类齐次边界条件;模型下端为二类齐次边界条件。电场分析结果如图6~7所示,其中图6为等电位线分布,图7为电场强度分布云图。由图6~7可知,靠近高压绕组的静电环左右拐角临近部位的等位线较密集,场强较高,最大电场强度出现在静电环表面油隙附近,约为7.0 kV/mm,沿油纸交界面的最大切向电场出现在靠近高压绕组的绝缘纸筒或角环油纸分界面上,电场强度约为2.0 kV/mm。对于酯油变压器,器身绝缘设计许用电场强度为10.5 kV/mm,绝缘安全裕度须大于1.4。把电场分析结果导入后处理软件,设定电场强度安全系数为1.4,选取场强较大点运用Kappeler曲线校核其安全裕度,发现这些场强较大的点均落在Kappeler曲线之下,即最大场强处的绝缘安全裕度大于1.4,满足酯类油变压器绝缘的设计要求。

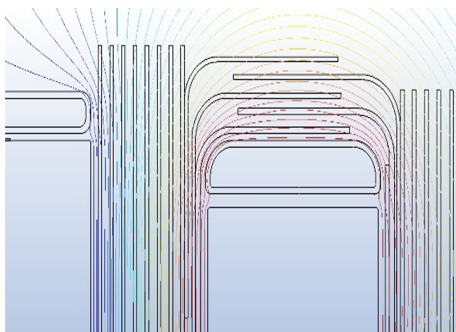


图6 工频下变压器主绝缘等电位线分布

Fig.6 Equipotential lines distribution of transformer main insulation under power frequency

3.2 温度场仿真

在变压器正常工作的温度下,酯油的运动黏度大于矿物绝缘油。采用自然油循环冷却方式时,在相同的冷却结构及散热条件下酯油变压器有更高的油顶层温升。根据以往110 kV/50 MVA天然酯电力变压器的温升试验结果,相比矿物绝缘油电力变压器,其油温梯度更大,油的平均温升变化不大,变

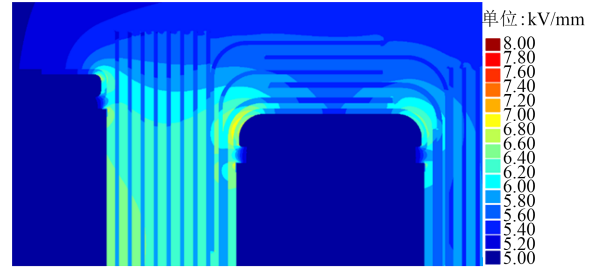


图7 工频下变压器主绝缘电场强度分布云图

Fig.7 Electric field intensity distribution nephogram of transformer main insulation under power frequency

压器油顶层温升高5 K左右,油底层温升下降5 K左右,油顶层和油底层温差增大10 K左右,绕组热点温升高5 K左右。

如需达到矿物绝缘油相同的温升限值,即I类绝缘组合温升限值,酯油变压器需要通过增加绕组径向和轴向油道尺寸以及外部散热器组数或片数来抵消其运动黏度大对散热能力带来的负面影响。本研究对该220 kV/150 MVA酯油变压器绕组的热点进行仿真计算,得到图8所示绕组热点温升梯度图。从图8可以看出,绕组热点温度出现在低压绕组端部,热点温升约为68 K,此时油顶层温升约为58 K,满足I类绝缘组合要求。

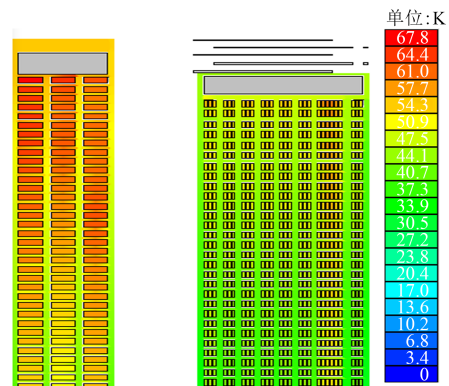


图8 变压器绕组温度场仿真图

Fig.8 Simulation diagram of transformer winding temperature field

变压器器身绝缘布置及温升计算均遵从酯油电力变压器I类绝缘组合的温升限值,如用户端接受II/III类绝缘组合的温升限值,则无需增大油道尺寸和冷却裕度,只需校核变压器器身绝缘裕度是否满足要求。

4 优化设计方案

4.1 防腐设计改进

采用天然酯绝缘油的变压器一般通过添加抗氧化剂、采取密封结构、减少露空时间等方法来提

高其氧化安定性。设备腐蚀会破坏天然酯绝缘油变压器的密封结构,极大影响油品质量。总结欧洲海上风电场的运行经验,海上升压站设备宜布置在全密封、微正压的屋内结构空间中,并配置带有海风处理装置的暖通空调系统;对运行发热量较大的设备,如主变压器采用本体布置在室内、冷却器布置在室外的冷却布置方式,以控制海上腐蚀环境对设备的影响。图9为推荐采用的主变压器防腐布置方案示意图。

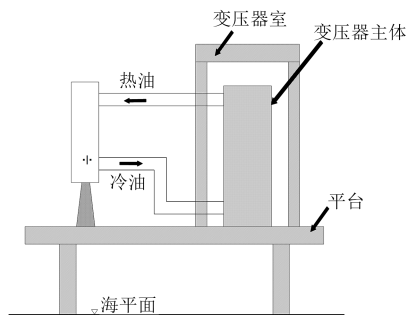


图9 海上升压站主变压器布置方案

Fig.9 Layout plan of main transformers for offshore substation

此外,电气设备和其他设备本身的防腐能力要加强和提高,使其防腐等级符合ISO 12944,并达到相应的C4级或C5级要求。

4.2 散热结构改进

相较于矿物绝缘油,酯油的运动黏度较大、流动性较差,因此酯油变压器对比矿物绝缘油变压器散热效果相对较差、温升较高,在变压器设计时需考虑提高酯油在绕组间以及油箱内的散热效果。对于海上升压站用酯油变压器的结构设计,建议采取如下改进措施:

(1)油道结构改进

酯油的运动黏度大,其在绕组油道中的流动性比矿物绝缘油差,不利于对流散热。因此,需要增大绕组间和绕组进出口处油道的宽度,即增大支撑油道的撑条高度,同时减小帘式油道的贴纸宽度,提高油流能力。

(2)散热器结构改进

为提高酯油在油箱内的散热效果,可以通过改进散热器的结构来实现。海上升压站变压器考虑免维护、装置结构简化等要求,优先选择自然风冷的冷却方式。布置在室外的散热器为满足防腐要求需增加防腐涂层,为了降低防腐涂层对散热效率的影响,一方面应增大散热片的散热面积,另一方面应适当增大散热器进出油口的直径。

4.3 防爆结构改进

酯油变压器相较于矿物绝缘油变压器具有更好的防火安全性,在变压器外部发生火灾时能保持更长时间不燃不爆,具有相对充裕的消防灭火时间。酯油变压器燃烧时内部压力会随着温度的升高而变大,因此海上升压站用酯油变压器在进行结构设计时需注意泄压装置的可靠性和压力设置的合理性,以确保其在火灾情况下的有效泄压。为了提高酯油变压器的防火性能,可采用耐高温的套管和密封垫等材料,提高变压器油箱的机械强度等措施,进一步提升其防火安全性。

4.4 防振结构改进

海上升压站长期受到波浪、海流、风、地震等影响,设备连接件、紧固件、法兰、阀门等易发生松动,铁心、线圈也会在这些因素影响下发生位移。相较于矿物绝缘油,酯油的饱和含水率较高、氧化安定性较低,密封松动会导致酯油加速劣化,因此需要对变压器上述部件进行加固处理,避免因振动导致漏油、腐蚀以及绝缘结构损坏等情况发生。

5 结论

(1)酯油变压器的应用在保证运行可靠性和寿命的前提下,可有效提高海上升压站的环保性和防火安全性,并有利于设备小型化的设计。

(2)采用I类绝缘组合的酯油变压器将油道尺寸增大20%~30%,变压器器身绝缘布置及温升可满足绝缘和温升限值要求。若采用II类、III类绝缘组合,则无需增大油道尺寸和冷却裕度,变压器器身设计上只需校核绝缘裕度是否满足要求,此类设计方案能够充分发挥酯油耐高温的特性以及实现设备小型化设计,可通过提升变压器综合性能水平解决海上升压站的经济性、环保性和可靠性需求。

(3)通过对酯油变压器防腐、散热、防爆、防振结构进行改进,可减少酯油散热、抗氧化能力的负面影响,使设备适应海上运行环境要求,提高运行可靠性。

参考文献:

- [1] 黄海龙,胡志良,代万宝,等.海上风电发展现状及发展趋势[J].能源与节能,2020(6):51-53.
- [2] VANDAD H, UNA B, INGAR L, et al. Offshore substation design: high-level overview of the industry best practices[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2019,17(4):67-74.
- [3] 李岩,冯俊杰,卢毓欣,等.大容量远海风电柔性直流送出关键技术及展望[J].高电压技术,2022,48(9):3384-3393.
- [4] 张宾瑞,王小刚,苏磊.海上升压站设计优化研究[J].南方能源建设,2023,10(1):105-111.

- [5] 张哲,叶军.海上风电场升压站电气设备选型研究[J].中国科技成果,2014(22):48-50,62.
- [6] 杨涛,王吉,王震宇,等.传统矿物绝缘油配电变压器直接更换天然酯绝缘油可行性研究[J].绝缘材料,2018,51(2):39-43.
- [7] 蔡胜伟,李华强,黄芝强,等.天然酯绝缘油变压器技术发展及应用概况[J].绝缘材料,2019,52(11):9-16.
- [8] 李松江,胡婷,曾四秀,等.植物绝缘油变压器的研究进展[J].绝缘材料,2021,54(8):18-23.
- [9] 刘彦男,王浩名,杜振斌,等.天然酯绝缘油对电力变压器绕组温升及过负载特性的影响[J].绝缘材料,2022,55(9):89-95.
- [10] 张亚杰,杜振斌,刘新颜,等.天然酯绝缘油在变压器中的应用研究与探讨[J].绝缘材料,2023,56(5):69-75.
- [11] 胡婷,曾四秀,李松江,等.天然酯与变压器固体材料相容性的研究[J].绝缘材料,2019,52(11):39-43.
- [12] 王建民,于东旭,王浩名,等.天然酯绝缘油对110kV电力变压器主纵绝缘强度的影响分析[J].绝缘材料,2023,56(1):62-69.
- [13] 赵钢超.海上升压站主变压器选择比较与分析[J].电气时代,2020(3):44-45,48.
- [14] 吴红菊,贺银涛.海上风电升压变压器散热方式选择[J].电工技术,2019(13):55-56,59.
- [15] 宁瀚如,胡益波,刘金波,等.大容量海上风电升压站主变压器抗短路能力分析[J].变压器,2021,58(2):6-10.
- [16] 傅春翔,罗璇瑶,酆洪柯,等.海上升压站大孤岛运行模式技术研究[J].电测与仪表,2019,56(21):74-80.
- [17] 杨建军,俞华锋,赵生校,等.海上风电场升压变电站设计基本要求的研究[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3781-3789.
- [18] 卢兆军,袁飞,郝泉,等.矿物油变压器注换两种酯类绝缘油的研究[J].绝缘材料,2022,55(1):62-66.
- [19] 马耀翔,王远,潘可欣,等.变压器用酯类绝缘液浸渍纸系统模拟低温热故障下的DGA分析[J].绝缘材料,2023,56(3):84-92.
- [20] 龙葵,李秋惠,周潮,等.浅谈天然酯绝缘油配变不同绝缘系统应用[J].变压器,2021,58(4):47-50.

收稿日期:2023-09-13;修回日期:2023-10-30。

作者简介:杨建军(1964-),男(汉族),浙江杭州人,教授级高级工程师,主要从事水电和新能源工程电气系统的设计研究;通信作者:杨国泰(1990-),男(汉族),湖北汉川人,工程师,主要从事变压器用绝缘材料与技术研究。