



大容量风电机组用66 kV干式绝缘升压变压器设计

张升^{1*}, 刘远¹, 贺之渊¹, 庞辉¹, 樊亚东², 雷清泉³

1. 先进输电技术国家重点实验室(国网智能电网研究院有限公司), 北京 102209;

2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072;

3. 青岛科技大学先进电工材料研究院, 青岛 266042

* 联系人, E-mail: zhangsheng@geiri.sgcc.com.cn

2022-03-03 收稿, 2022-06-16 修回, 2022-06-17 接受, 2022-06-20 网络版发表

国家电网公司科技项目(5500-202058321A-0-0-00)资助

摘要 大规模海上风电开发成为当前可再生能源发展的必然趋势, 海上风电已从近海走向远海, 风电机组(简称风机)容量达8 MW以上. 升压变压器将风机出口电压由0.69~1.4 kV升至35 kV及以上, 是风电系统的核心装备. 远海风电离岸距离50 km, 升压变压器的电压需提升至66 kV及以上, 因66 kV干式绝缘升压变压器属产品空白, 目前普遍采用油浸式变压器. 相比油浸式技术, 干式绝缘变压器火灾风险低, 防爆性能好, 易于维护. 但传统的环氧树脂浇注干式绝缘变压器技术因存在界面缺陷难以调控而导致局部放电问题, 难以应用于66 kV升压变压器. 本文提出了一种66 kV/10 MVA干式绝缘升压变压器设计方法, 通过对高压绕组绝缘机理的分析, 提出了融合半导体屏蔽层和导线绝缘层的高压绝缘屏蔽导线多层共挤设计方法, 替代传统绕包电磁线的设计, 可实现对导体界面缺陷的屏蔽, 以及导线绝缘与高压绕组主绝缘的充分相容, 有效解决了绝缘界面缺陷抑制难题. 设计了66 kV/10 MVA升压变压器结构, 高压绕组具有沿面伞裙结构, 可实现紧凑空间的高爬电距离设计. 通过对变压器的电场、磁场和热场等多物理场仿真分析, 获得了电场、磁场和热场分布特性, 验证了变压器设计的合理性. 研制了66 kV原理样机, 开展了交流耐压和局部放电测试, 局部放电量小于5 pC, 验证了设计方法的可行性.

关键词 海上风电, 升压变压器, 绝缘结构, 硅橡胶主绝缘, 多物理场分析, 样机研制

随着社会和经济的飞速发展, 全球能源变革加速, 能源利用与开发正在从传统不可再生能源向绿色可再生能源进行过渡^[1]. 风能作为一种可再生、储量大的清洁能源日益引起各国重视. 与陆地风电相比, 海上风电风能资源的能量效益比陆地风电场高20%~40%, 具有风速高、沙尘少、运行稳定等优势^[2~4], 同时还能够减少机组的磨损, 延长风机的使用寿命, 非常适合大规模开发.

我国海岸线漫长, 海上风能资源丰富, 海深5~50 m区域可开发风能储量达500 GW^[5,6]. 随着海上风电技术的发展, 风电建设成本也在快速下降, 尤其在当前风电

开发政策的激励下, 我国海上风电快速发展, 截至2020年末, 海上风电并网装机容量达到约1000万kW^[7,8]. 近两年来, 我国远海风电工程建设加速, 千兆瓦级的远海风电工程开始实施.

随着海上风电开发的规模不断增大, 海上风机的单机容量提升至10 MW及以上. 目前工程中使用的单机容量最大的海上风机是MHI Vestas V164, 其容量为9.5 MW, 该机型已应用于爱尔兰海的工程项目. 随着海上风电场规模的不断扩大, 各风机制造商都在参与大型风机的研究. 目前世界上最大的动力风机是Haliade-X风力涡轮机, 额定功率为12 MW^[9~11]. 我国海上风电

引用格式: 张升, 刘远, 贺之渊, 等. 大容量风电机组用66 kV干式绝缘升压变压器设计. 科学通报, 2022, 67: 3603–3612

Zhang S, Liu Y, He Z Y, et al. Design of 66 kV dry-type step-up transformers for large capacity wind turbines (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 3603–3612, doi: 10.1360/TB-2022-0239

的风机以4 MW为主,已吊装的最大功率机组达到了8 MW.由近海(≤ 50 km)发展至远海(大于50 km)的海上风机容量基本都达到8 MW以上,也是目前技术发展的必然趋势^[12].

风机的发电机出口电压一般为0.69~1.4 kV,由于风机距离海上高压输电平台较远,为了实现电力的经济传输,需要用升压变压器将电压升高至一定电压.对于近海的8 MW及以下风机,一般需要将电压升至35 kV,对于远海且容量大于8 MW的风机,需要将电压升至66 kV及以上^[13~15].目前35 kV升压变压器普遍采用环氧树脂浇注结构的干式绝缘设计,结构紧凑,运维简便,火灾和爆炸风险低^[16].该类型升压变压器由于采用环氧树脂直接对高压绕组线圈导线进行浇注成型的方法,导致界面缺陷多、微间隙及裂纹难以消除,高电压下电场将集中分布在上述微小缺陷上,引起局部放电.根据干式绝缘变压器的设计要求,局部放电量要求不超过5 pC,而对于变压器内部的缺陷,电压的提升导致场强增大,诱发局部放电量超标.局部放电量的增大会进一步破坏绝缘结构,严重情况下会导致绝缘击穿.同时,环氧树脂传热能力差,长期运行易发生热老化开裂,制约了该技术在更大容量变压器技术上的应用.目前在建的大容量海上风电工程普遍采用油浸式66 kV升压变压器,干式绝缘结构66 kV升压变压器属于产品空白.油浸式变压器采用变压器油介质,火灾隐患大,运维成本高^[17],不是海上风机升压变压器的理想选择方案.

海上风电升压变压器工作环境恶劣,海上高湿度、高盐雾、长日照、重腐蚀,环境非常苛刻,对海上风电设备的绝缘、污秽、腐蚀防护提出了严峻挑战.同时,海上风电由于其特殊的地理环境和技术要求,维修费用极高,要求设备必须具有很高的可靠性.

针对当前海上风电技术发展需求以及技术现状,本文围绕66 kV/10 MVA干式绝缘升压变压器开发,着重分析了升压变压器的绝缘设计机理,提出了一种高压绕组界面缺陷抑制方法,通过具有界面缺陷屏蔽功能的多层共挤高压绝缘屏蔽导线,实现了高压绕组导体与主绝缘之间界面特性的有效调控.设计了可满足主绝缘耐受和高盐雾环境下沿面绝缘要求的高压绕组结构和66 kV/10 MVA升压变压器结构,研制出升压变压器样机,并开展试验测试.测试结果表明,所述方法可实现高压绕组的低局部放电设计,工程应用前景巨大.

1 海上风电升压变压器设计要求

海上风电汇集及送出方式有两种^[3]:一种是海上风电交流输电系统送出,如图S1(a)所示,风机输出的交流电能,经过升压变压器升压至35~66 kV,再通过交流汇集电缆输送至海上升压站,将电压再次升压至132~400 kV,通过高压交流海缆输送至岸上变电站,接入当地交流电网.另一种是海上风电经柔性直流输电系统送出,如图S1(b)所示,升压变压器输出的电能海上换流站汇集,通过柔性直流系统,将交流电转化为高压直流电,通过高压直流海缆输送至岸上换流站,转换为交流电接入交流电网^[18].

不管是哪种海上风电接入方式,升压变压器都是电能传输和电压变换的关键设备.升压变压器的电压选择主要取决于风机与海上升压站或海上换流站的距离,近海选择35 kV等级,远海则选择66 kV及以上等级.升压变压器的容量取决于风机设计容量.35和66 kV升压变压器的典型技术参数要求如表1所示.

考虑到海上风电应用的特殊性,升压变压器的设计还需要兼顾考虑以下关键因素:频繁的负荷波动和雷电、操作过电压,海上高盐高湿的环境,冷热多变的

表 1 升压变压器典型技术参数

Table 1 Typical technical parameters of step-up transformers

技术参数	35 kV升压变压器	66 kV升压变压器
电压比	0.69/35 kV	0.69(1.37)/66 kV
额定容量	≤ 8 MVA	> 8 MVA
联结组别	Dyn11	Dyn11
分接	$\pm 2 \times 2.5\%$	$\pm 2 \times 2.5\%$
短路阻抗	$> 10\%$	$> 10\%$
空载损耗	< 15 kW	< 12 kW
负载损耗	< 50 kW	< 100 kW
防护等级	IP44	IP68
额定电压(有效值)	35 kV	66 kV
最高运行电压(有效值)	40.5 kV	72.5 kV
相对地局部放电测试电压	26 kV	55 kV
相间局部放电测试电压	45 kV	95 kV
外施耐受电压(有效值)	85 kV	140 kV
雷电冲击电压峰值(全波)	125 kV	325 kV
雷电冲击电压峰值(截波)	140 kV	360 kV
绝缘形式	干式绝缘	油浸式
绝缘等级	F级	A级
局部放电水平	5 pC	100 pC
防腐等级	C5-M	C5-M

天气, 狭小安装空间对紧凑化的要求等. 另外, 海上维护成本高, 对产品质量可靠性要求更高^[19,20]. 目前尚未有干式绝缘结构的66 kV变压器标准或者技术规范, 因此, 参照66 kV油浸式变压器的设计标准, 确定了干式绝缘结构的66 kV升压变压器的设计参数, 作为绝缘设计的依据和输入.

对于油浸式66 kV升压变压器, 局部放电测试电压下的最大局部放电量应不超过100 pC, 但对于干式绝缘变压器, 考虑设备可靠性, 局部放电量应不超过5 pC, 这是对绝缘设计的一大挑战, 也是关键设计难点.

2 66 kV/10 MVA升压变压器主绝缘设计

2.1 绝缘设计机理

环氧树脂浇注变压器是目前在我国应用最普遍的干式变压器. 高压绕组线圈采用漆包线绕包Nomex纸, 或者裸导线绕包聚酰亚胺薄膜, 实现高压绕组导线的匝间绝缘, 按照一定的绕组绕制形式, 将导线绕制成一定匝数的线圈, 然后整体浇注环氧树脂, 形成高压绕组整体结构^[21,22]. 这种高压绕组设计方法, 因制造工艺、设计结构、异质材料之间的不相容性, 不可避免在导线的漆层与Nomex纸或者导线与聚酰亚胺薄膜之间、导线绝缘层与环氧树脂之间形成不规则的界面, 如图1(a)所示, 由此产生微裂纹、气隙和气泡聚集等缺陷, 在外施电压作用下, 高场强区域的缺陷会导致局部放电, 使得环氧树脂绝缘劣化, 最终导致绝缘击穿. 变压器长期运行过程中产生损耗, 高压绕组温度升高, 导线、绕组匝间绝缘材料、环氧树脂的热膨胀系数有较大差异, 在同等温升下的膨胀参数不同, 加剧了界面缺陷的扩大, 在电压、热激发下, 易发生环氧树脂与导线的剥离, 导致局部放电增大, 加速了绝缘老化, 导致绝缘击穿^[23~25].

环氧树脂浇注变压器的不规则界面所带来的缺陷, 是由异质介质结构所造成的必然结果. 要提升干式变压器的电压水平, 并保持低局部放电水平, 只能最大限度消除界面缺陷. 为此, 本文提出了基于导线半导体屏蔽的绝缘界面调控设计方法, 如图1(b)所示, 在高压绕组线圈裸导线的外部先包裹半导体屏蔽层, 然后在半导体屏蔽层外包裹绝缘层, 最后再浇注主绝缘材料, 半导体屏蔽层的基体材料、导线绝缘层材料与主绝缘是同一种介质. 半导体屏蔽层与导线之间的不规则界面被半导体屏蔽层屏蔽, 类似法拉第笼原理, 半导体屏蔽层内的电场强度接近于零, 即使有不规则界面引发的缺陷, 也不会引起局部放电, 而半导体屏蔽层与导体绝缘层、导线绝缘层与主绝缘均为同一种介质, 则可以充分相容, 形成规则的界面, 从而大幅降低界面缺陷.

由图1(a)可知, 对于环氧树脂浇注变压器, 异质结构导致的界面是制约其性能提升的主要因素, 以当前变压器的浇注工艺, 无法通过方法改进来消除界面缺陷. 而对于海上风电升压变压器而言, 严苛的运行条件对变压器绝缘结构提出了苛刻要求, 即使在66 kV等级下, 局部放电的设计限值仍要求不超过5 pC, 这是制约环氧树脂浇注路线应用于66 kV升压变压器设计的关键. 同样从电场角度分析, 界面缺陷在高场强作用下发生局部放电, 如果降低界面缺陷区域的场强, 则可有效控制局部放电. 图1(b)所述的半导体屏蔽结构, 除了对屏蔽层与导线间界面缺陷的屏蔽外, 还等效于增大了导线的曲率半径, 从而降低了场强, 减小了局部放电的风险.

基于图1(b)的高压绕组界面设计原理, 通过对主绝缘材料改性, 形成电阻率较低的半导体屏蔽材料, 采用多层共挤技术, 形成高压绕组的绝缘屏蔽导线, 然后再绕制成线圈结构, 并浇注主绝缘材料, 形成高压绕组整体结构.

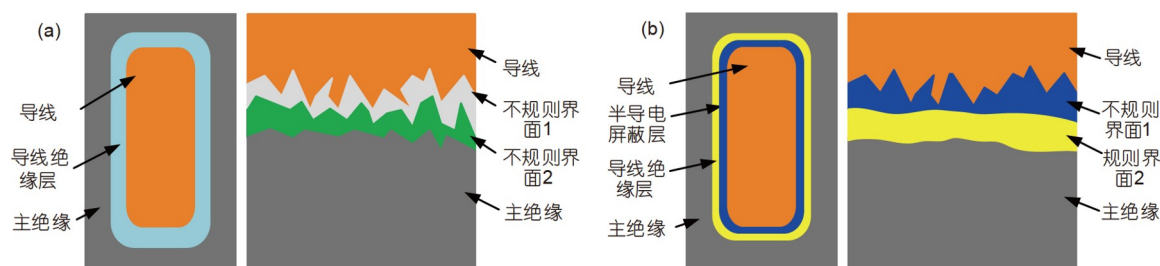


图1 (网络版彩色)高压绕组主绝缘界面结构示意图. (a) 环氧树脂浇注干式变压器绝缘结构; (b) 含半导体屏蔽的新型绝缘结构
Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the main insulation interface structure of high-voltage windings. (a) Insulation structure of epoxy resin cast dry-type transformers; (b) new insulation structure with semi-conductive shielding

2.2 主绝缘材料选型

目前常用的树脂浇注结构干式变压器的主绝缘材料一般为环氧树脂。环氧树脂有很多种,应用最普遍的是双酚A型环氧树脂,是由双酚A、环氧氯丙烷在碱性条件下缩合,经水洗,脱溶剂精制而成的高分子化合物。在进行高压绕组绝缘结构浇注时,环氧树脂配合固化剂、增韧剂、促进剂等添加成分固化成型。环氧树脂为热固性材料,在回收利用上有很多限制,属于非环保性材料,另外,环氧基中C原子的存在导致绝缘击穿后形成导电通道,绝缘无法恢复^[24,25]。

通过对已经应用于高压交直流工程且经过验证的聚合物材料进行调研,经过改性的硅橡胶材料在高压交直流绝缘子和高压电缆附件中已经普遍应用^[26,27]。硅橡胶具有优良的电绝缘性能、良好的机械弹性和较好的高低温性能,具有一定绝缘自恢复能力,而且该材料具有良好的加工成型特性,适用于高压绕组导线的挤出成型设计。通过对硅橡胶掺杂导电或半导体材料,可改性为半导体材料,用作导线的屏蔽材料。

实测了所选用的改性硅橡胶材料在20、40、60、70和80°C,不同场强(10~40 kV/mm)下电阻率参数,如表2所示。在场强恒定情况下,温度升高,电阻率减小,尤其在高温下,电阻率急剧减小。在常温30 kV/mm场强下,改性硅橡胶电阻率为 10^{12} Ω·m量级,80°C时减小至 10^{10} Ω·m量级,减小了约两个数量级。硅橡胶电阻率与温度 T 、电场 E 的这种关系,是变压器高压绕组绝缘设计、电场控制和结构优化的关键。

除了电阻率与温度、电场的参数关系外,其他与改性硅橡胶相关的关键参数如表S1所示。

2.3 绝缘结构设计

66 kV升压变压器的绝缘设计重点是高压绕组,主要分为绕组匝间绝缘设计和绕组对地绝缘设计,需要综合考虑绝缘材料耐受特性、结构形式、电压耐受特

性等。对于绕组匝间绝缘设计,则需要考虑匝间耐受的暂稳态电压、导线的绕制形式和布置结构,而对于绕组对地绝缘设计,则主要考虑绕组相对地暂稳态电压、整体结构和端部场强控制。

高压绕组的绝缘厚度 t 由基于运行寿命周期内承受的各种电压来确定,按照长期运行最高电压和暂态冲击电压均满足要求来计算^[28]。

按照长期运行最高电压确定的绝缘厚度:

$$t_{ac} = U_m k_1 k_2 k_3 / E_{ac}, \quad (1)$$

式中, U_m (kV)为长期运行最高电压; k_1 为温度系数,取2~4; k_2 为老化系数,取1.2; k_3 为裕度系数,取1.1; E_{ac} (kV/mm)为工作电压下的电场强度。

按照雷电冲击电压确定的绝缘厚度:

$$t_i = U_{BIL} k_1' k_2' k_3' / E_i, \quad (2)$$

式中, U_{BIL} (kV)为雷电冲击电压; k_1' 为温度系数,取1.1; k_2' 为老化系数,取1.25; k_3' 为裕度系数,取1.2; E_i (kV/mm)为雷电冲击电压下的电场强度。

以高压绕组绝缘设计为例,高压绕组长期运行最高电压为72.5 kV(相间电压),则相对地电压为 $72.5 / \sqrt{3}$ kV,考虑材料老化因素,硅橡胶在长期运行温度下的最大允许工作强度为15 kV/mm。对于雷电冲击过电压下的绝缘厚度计算,如式(2)所示, U_{BIL} 取325 kV,冲击下场强 E_i 取值20 kV/mm。

对于绕组匝间绝缘设计,与高压绕组对地绝缘设计方法相同,只是电压幅值不同。

3 66 kV/10 MVA升压变压器整机设计

3.1 变压器结构设计

66 kV/10 MVA变压器的接线方式采用Dyn11接线方式,分接采用 $\pm 2 \times 2.5\%$ 。考虑到变压器的可靠性和热稳定性,在进行温升设计时,按照满负荷运行工况下温

表2 硅橡胶电阻率测试数据

Table 2 Silicone rubber resistivity test data

E (kV/mm)	ρ (Ω·m)				
	20°C	40°C	60°C	70°C	80°C
10	4.52×10^{13}	1.05×10^{13}	3.23×10^{12}	1.34×10^{12}	8.06×10^{11}
20	1.01×10^{13}	2.74×10^{12}	6.94×10^{11}	3.30×10^{11}	2.11×10^{11}
30	3.67×10^{12}	1.08×10^{12}	2.72×10^{11}	1.23×10^{11}	7.62×10^{10}
40	1.65×10^{12}	5.49×10^{11}	1.31×10^{11}	6.05×10^{10}	3.77×10^{10}

升不超过100 K设计。

基于改性硅橡胶的66 kV/10 MVA升压变压器设计结构如图2所示。低压侧采用箔式绕组结构, 为了便于散热, 设置了气道, 将其间隔为3层。高压绕组采用绝缘屏蔽导线绕制而成, 然后整体浇注改性硅橡胶, 形成一个整体结构。考虑到升压变压器在海上应用的高盐雾腐蚀工况, 对低压绕组、连接母排、铁芯及铁芯夹件等均进行了防腐设计。针对海浪频繁冲击、极端天气工况的冲击和海上运输等工况, 变压器支撑结构采用柔性抗震支撑设计, 可满足运行过程中长期0.1 g和短时0.4 g振动加速度冲击。

升压变压器高压侧相间采用管型母线连接, 管型母线的圆形结构有利于改善电场分布, 避免局部电场集中。管型母线的外部包裹硅橡胶绝缘层可以提升相间绝缘耐受能力, 减小相间导线之间的空气净距, 便于紧凑化设计。

高压绕组结构如图2(b)所示, 以绝缘支撑筒为基础, 绕制高压绕组线圈, 然后整体浇注硅橡胶主绝缘。高压绕组线圈包括进出线端子和分接端子, 分接端子与 $\pm 2 \times 2.5\%$ 分接设计要求对应。为了保证高压绕组在运行过程中的良好散热, 在纵向结构上, 设计了贯穿性的阵列分布的双层气道。为了保证一定污秽等级下沿面绝缘耐受可靠性, 在高压绕组的进出线端子和主体结构上设计了伞裙结构, 用于增大沿面爬电距离。

3.2 变压器外绝缘设计

66 kV升压变压器的外绝缘设计主要包括空气净距和爬电距离的确定。对于空气净距, 是针对自恢复型的空气绝缘进行设计, 与变压器承受的雷电冲击过电

压对应。对于爬电距离, 则与变压器承受的稳态运行电压对应, 主要是进行沿面绝缘设计, 受变压器的应用环境条件影响, 比如盐雾、湿度和温度等。

3.2.1 空气净距的确定

66 kV升压变压器承受的主要是全波和截波雷电冲击过电压, 从严苛性角度考虑, 全波雷电冲击过电压对外绝缘的要求更为苛刻。在雷电冲击过电压作用下, 棒板间隙结构的负极性击穿强度大大高于正极性下的值, 因此可按照正极性雷电冲击过电压进行外绝缘设计。施加标准雷电冲击过电压, 正极性下的绝缘强度的实验数据可以近似为

$$U_{50} = 530 K_{\text{ff}}^+ d, \quad (3)$$

式中, $U_{50}(\text{kV})$ 为标准雷电冲击过电压下50%放电电压值; K_{ff}^+ 为正极性雷电冲击过电压下的间隙系数; $d(\text{m})$ 为空气净距。

对于标准雷电冲击电压, 间隙系数 K_{ff}^+ 可以根据操作冲击间隙系数确定:

$$K_{\text{ff}}^+ = 0.74 + 0.26K, \quad (4)$$

式中, K 为间隙折算系数, 对于变压器结构, 一般取1.1~1.15。

雷电冲击保护水平对应的 U_{50} 计算公式如下:

$$U_{50} = \frac{k \times \text{LIPL}}{1 - 2\sigma}, \quad (5)$$

式中, k 为雷电冲击绝缘耐受裕度; LIPL为雷电冲击保护水平; σ 为标准方差。

由式(3)~(5)可确定变压器的相对地最小空气净距, 根据66 kV变压器的雷电过电压水平, 可计算出最小空

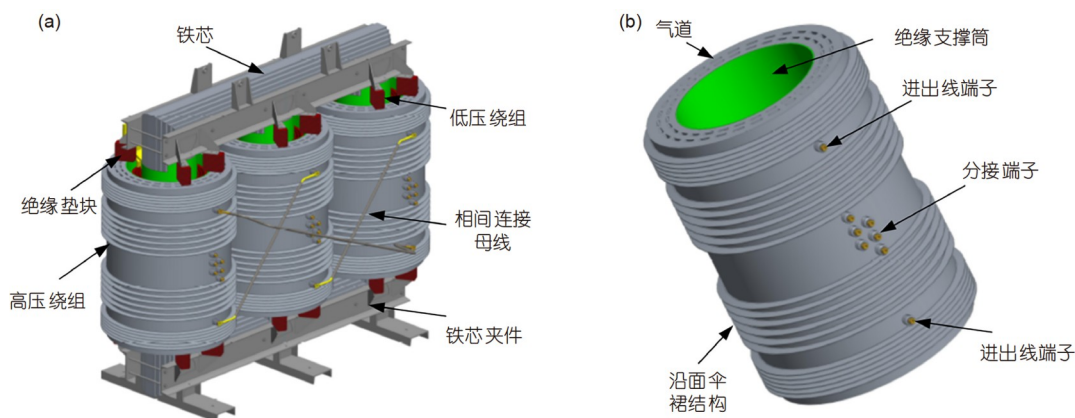


图2 (网络版彩色)66 kV/10 MVA升压变压器设计。(a) 变压器整体结构;(b) 高压绕组结构

Figure 2 (Color online) Design of the 66 kV/10 MVA step-up transformer. (a) Transformer structure; (b) high voltage winding structure

气净距为710 mm.

3.2.2 爬电距离的确定

海上风机长期处于高盐高湿的环境,对变压器绝缘表面产生很大的影响,如果爬电距离选取不合理,则极易引发在运行电压或者冲击电压下的沿面闪络.

对于海上的高盐雾环境,按照重污秽等级设计爬电距离,爬电比距应不低于35 mm/kV,从运行角度分析,仍然不能解决沿面污闪问题.因此,一般采用箱式结构,内部增加了除盐除湿的空调系统,确保变压器在相对清洁环境中运行,可达到0级污秽或者I级污秽水平.对于0级污秽,爬电比距一般选取不低于14 mm/kV;对于I级污秽,爬电比距一般选取不低于20 mm/kV.

为了确保在稳态电压下沿面绝缘耐受的可靠性,66 kV升压变压器的高压绕组设计了如图2所示的伞裙结构,用于增加沿面爬电距离.

4 升压变压器多物理场分析

4.1 电场分析

根据升压变压器设计结构,建立静电场有限元分析模型.66 kV/10 MVA升压变压器的绝缘结构包括低压绕组铜箔间的绝缘纸,低压绕组外侧的绝缘漆,高、低压绕组内置的绝缘支撑筒,以及高压绕组匝间的硅橡胶绝缘层、硅橡胶整体浇注绝缘等.66 kV/10 MVA升压变压器的关键材料参数如表S2所示.

高压绕组是静电场分析的关键,相对地电压和相间电压均加载在高压绕组.高压绕组的绕线形式如图S2所示,在进行电场分析时,以其中靠近地面的一个输出端子接地,按照绕线方向逐级加载电压,另外一个输出端子承受最高电压.传统方法采用导线逐层交叠卷

绕并独立成一饼,相邻两饼之间焊接,存在导线断点,以诱发界面缺陷.而本方法与之相比,在同等匝数下,每一饼的层间电压降低1倍,同时相邻两饼之间连续绕制,不存在导线断点,减少了界面缺陷.

考虑设计裕度,在对高压绕组进行电压加载时,相对地电压按照53.5 kV加载.高压绕组内层电势分布如图3(a)所示.高压绕组的电场分布如图3(b)所示,在轴向方向,电场主要集中于最上层线圈,这主要是由于顶部一层线圈的电位最高且受端部效应影响.在径向方向,靠近绝缘支撑筒绕组线圈内侧电场远高于其他层线圈,这主要由不同层线圈的曲率半径差异造成.图3(c)给出了高压绕组顶层端部电场局部放大图,可以看出,高压绕组在最上层线圈的内侧第一匝导线的左上角出现最大场强.该线圈承受的电势较高,且其左端紧贴环氧树脂绝缘筒且浇注硅橡胶,两者不同的相对介电常数带来了较大的电位梯度变化,从而产生了该区域附近不均匀的场强分布.在53.5 kV相对地电压下,高压绕组电场最大值约为28.35 kV/cm,说明了高压绕组导线的半导电屏蔽设计能够有效改善电场分布.

4.2 磁场分析

建立了变压器的三维磁场仿真模型,在该模型中设定变压器各部件的材料均匀、各向同性、均为常数,所采用的铁芯硅钢片的型号为23QG100.

图4给出了变压器铁芯的磁密分布云图和磁力线分布云图.由图4(a)可知,磁感应强度分布比较均匀,磁感应强度呈对称性分布,铁芯中最大磁通密度位于铁芯中柱外表面的4个角,为1.72 T,最小磁通密度位于铁芯外表面的4个角,为0.06 T.绕组中的磁感应强度分布也比较均匀,各相绕组Z轴方向的漏磁场基本呈上下对

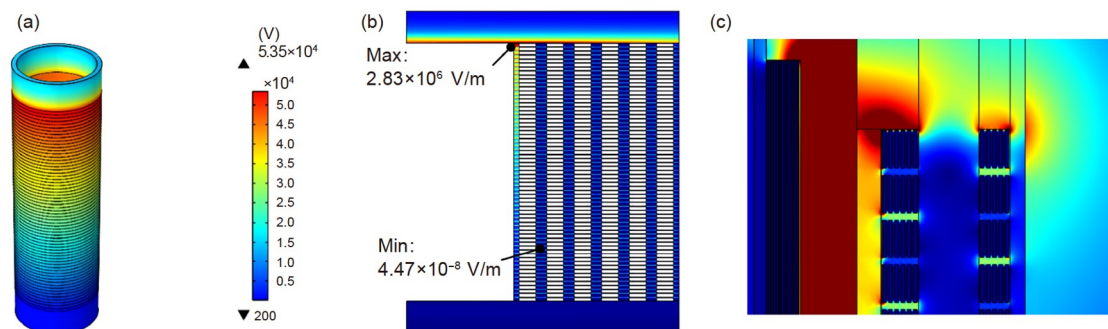


图3 高压绕组电势电场分布图. (a) 内层电势分布图; (b) 内部电场分布云图; (c) 端部电场局部放大图

Figure 3 Potential and electric field distribution diagram of the high-voltage windings. (a) Potential distribution diagram; (b) electric field distribution cloud map; (c) local enlarged electric field view at the end of the high-voltage winding

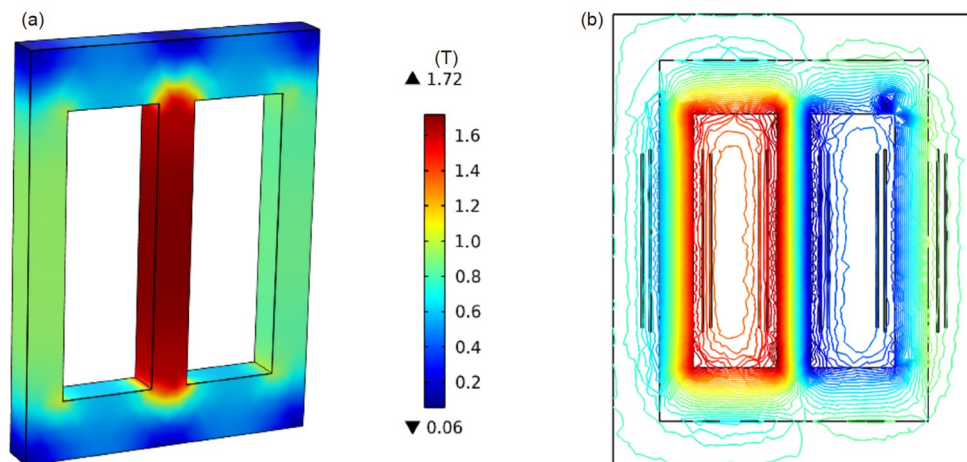


图4 变压器磁密与磁力线分布云图. (a) 磁密分布云图; (b) 磁力线分布云图

Figure 4 Transformer magnetic density and magnetic field line distribution cloud map. (a) Magnetic density distribution cloud map; (b) magnetic field line distribution cloud map

称分布. 从图4(b)可以看到, 磁力线基本呈上下对称分布, 在铁芯内部, 磁力线沿轴向平行于铁芯柱分布, 在上下端部, 磁力线出现弯曲, 趋向沿铁轭方向分布. 磁力线主要集中在主磁场中, 中间相铁芯柱上的磁力线幅值较大, 最大值达 2×10^{-5} Wb/m. 由于边缘效应, 会出现变压器内部密集的磁力线向外发散的情况, 即在变压器铁芯与空气外边界之间也会存在磁路, 这跟变压器实际正常工作时的情况是一致的.

变压器在正常工作状态下, 产生的漏磁场会导致变压器内出现附加的损耗, 损耗将进一步使温度升高, 严重时可能损害到变压器的主绝缘. 变压器漏磁场轴向分布如图S3所示, 铁芯与低压绕组间的漏磁场在绕组的中部出现最小值0 T左右, 并基本保持不变, 绕组两端部漏磁通的密度逐渐上升, 在靠近绕组端部附近出现最大值, 为0.015 T. 高、低压绕组间的漏磁场则是在绕组中部处出现最大值0.055 T后, 向绕组两端的方向逐渐减少, 在端部处漏磁通密度出现最小值0.0375 T, 这也同图4的磁力线分析一致. 综合两个漏磁场的分布结果来看, 高、低压绕组间的漏磁通密度大于铁芯与低压绕组间的漏磁通密度, 产生的绕组损耗和温升也会较高.

4.3 热场分析

建立了升压变压器热场分析模型, 分析其在额定负载工况下的温升特性, 得出变压器工作20 h稳定后的三维温度云图, 如图5所示. 可以看到, 变压器内部最热点温度为387.705 K, 温升94.5 K, 低于耐热等级的干

式变压器绕组的温升限值100 K. 最热点出现在低压绕组上方, 靠近顶部位置.

由于高压绕组上端部与下端部均存在约240 mm高的硅橡胶结构, 因此高压绕组内部的轴向温差比较大, 约为77.9 K, 高压绕组外层的最大轴向温差为55.9 K. 高压绕组外层的稳态温升远小于高压绕组内层的稳态温升, 这是由于外层与右边界空气流体的接触面大, 对流散热效果显著.

5 样机研制及测试

根据66 kV/10 MVA样机设计及主绝缘材料选型, 基于开发的3层共挤绝缘屏蔽导线, 试制了高压绕组样机, 并搭建了两相变压器原理样机, 如图6所示, 以验证设计方法的可行性和合理性.

对高压绕组样机开展了交流耐压及局部放电测试,

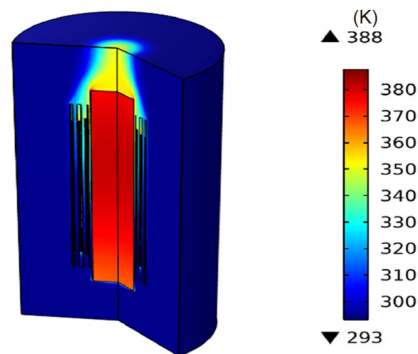


图5 变压器温度云图

Figure 5 Transformer temperature cloud map

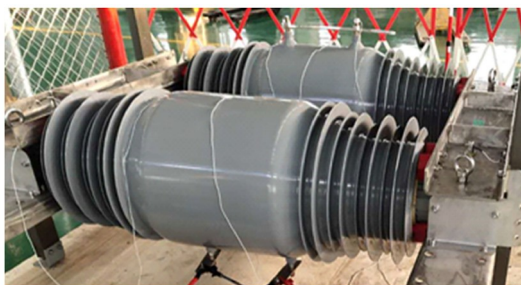


图6 (网络版彩色)变压器样机
Figure 6 (Color online) Transformer prototype

试验要求为: 试验电压55 kV/30 min下, 视在电荷量的连续水平不超过5 pC. 测试表明, 对高压绕组施加端子对地电压120 kV/1 h, 试验过程局部放电量 <5 pC, 无闪络, 无击穿.

6 结论

本文提出了一种新型的66 kV/10 MVA干式绝缘升压变压器设计方法, 分析了绝缘提升机理, 仿真分析了变压器的多物理场特性, 研制了变压器验证样机, 并测

试了性能, 主要研究结论如下.

(1) 基于提出的新型的多层共挤绝缘屏蔽导线, 采用导线绝缘层、屏蔽层与高压绕组主绝缘同基体的绝缘材料, 实现界面的充分相容, 有效地实现绕组缺陷的抑制.

(2) 通过试验测试和理论计算的方法, 确定了改性硅橡胶材料的关键性能参数, 计算了高压绕组的主绝缘参数, 基于暂稳态电压, 确定高压绕组的主绝缘最小厚度, 设计了66 kV/10 MVA升压变压器结构, 可满足主绝缘和沿面绝缘要求.

(3) 分析了不同工况下66 kV/10 MVA升压变压器的电场、热场和磁场特性, 表明变压器参数及结构设计满足预期要求.

(4) 试制了高压绕组和两相变压器原理样机, 并开展了试验测试, 结果表明, 在120 kV/1 h交流电压下, 高压绕组局部放电量 <5 pC, 变压器绝缘性能优良.

本文研究成果可实现目前正在快速发展的深远海大容量风电领域应用, 为风电能源的高效送出提供了关键设备支撑.

参考文献

- Zhang Y S, Dong D, Xiao Y, et al. Current status and trends in energy production, consumption, and storage under carbon neutrality conditions in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 4466–4476 [张永生, 董舵, 肖逸, 等. 我国能源生产、消费、储能现状及碳中和条件下变化趋势. 科学通报, 2021, 66: 4466–4476]
- Li J J, Wang G D, Li Z H, et al. A review on development of offshore wind energy conversion system. *Energy Res*, 2020, 44: 9283–9297
- Islam M R, Guo Y, Zhu J. A review of offshore wind turbine nacelle: Technical challenges, and research and developmental trends. *Renew Sustain Energy Rev*, 2014, 33: 161–176
- Wang L C, Wei J, Wang X D, et al. The development and prospect of offshore wind power technology in the world. In: 2009 World Non-grid-connected Wind Power & Energy Conference. New York: IEEE, 2009
- Li W, Yao H, Wang H Q, et al. Latest development status of offshore wind power in China—The perspective of developers. *J Renew Sustain Ener*, 2014, 6: 053138
- Liu D B. China wind power development status and trends. *Adv Mater Res*, 2013, 724–725: 531–539
- Li Y W. Research and prospect of offshore wind power. *Adv Mater Res*, 2014, 1049: 743–746
- Zhao X, Ren L. Focus on the development of offshore wind power in China: Has the golden period come? *Renew Energy*, 2015, 81: 644–657
- Yang G Y. Review on engineering practices and future technology prospects of European offshore wind power (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2021, 45: 23–32 [杨光亚. 欧洲海上风电工程实践回顾及未来技术展望. 电力系统自动化, 2021, 45: 23–32]
- Diaz H, Soares C G. Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms. *Ocean Eng*, 2020, 209: 1–21
- Li J, Wang G, Li Z, et al. A review on development of offshore wind energy conversion system. *Int J Energy Res*, 2020, 44: 9283–9297
- He Z X, Xu S C, Shen W X, et al. Review of factors affecting China's offshore wind power industry. *Renew Sustain Energy Rev*, 2016, 56: 1372–1386
- Rahman S, Khan I, Alkhamash H I, et al. A comparison review on transmission mode for onshore integration of offshore wind farms: HVDC or HVAC. *Electronics*, 2021, 10: 1–15
- Ryndzionek R, Sienkiewicz L. Evolution of the HVDC link connecting offshore wind farms to onshore power systems. *Energies*, 2020, 13: 1–17
- Holdyk A, Kocewiak L H. Resonance characteristics in offshore wind power plants with 66 kV collection grids. *J Phys Conf Ser*, 2019, 1356: 012025

- 16 Etxegarai A, Valverde V, Eguia P, et al. Analysis of loss of life of dry-type WTSU transformers in offshore wind farms. *Int J Energy Res*, 2020, 10: 448–455
- 17 Wimmer J, Tanner M R, Nunn T, et al. Dry-type-vs.-liquid-immersed transformers: Specification installation and operational impact in a marine environment. In: 2011 IEEE Record of Conference Papers Industry Applications Society 58th Annual IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC). New York: IEEE, 2011. 1–8
- 18 Cai X, Yang R X, Zhou J Q, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2021, 45: 1–21 [蔡旭, 杨仁焄, 周剑桥, 等. 海上风电直流送出与并网技术综述. *电力系统自动化*, 2021, 45: 1–21]
- 19 Nejad A R, Guo Y, Gao Z, et al. Development of a 5 MW reference gearbox for offshore wind turbines. *Wind Energ*, 2016, 19: 1089–1106
- 20 Luo W, Zeng Z J, Li L F, et al. Influence of wind power converter on the offshore wind farm reliability (in Chinese). *South Power Syst Technol*, 2021, 15: 21–33 [罗炜, 曾至君, 李凌飞, 等. 风电机组变流器对海上风电场可靠性的影响. *南方电网技术*, 2021, 15: 21–33]
- 21 Cai D G, Tang J Q. Summary of insulating material, insulation structure and system for dry-type transformer (in Chinese). *Insul Mater*, 2019, 52: 1–8 [蔡定国, 唐金权. 干式变压器用绝缘材料、绝缘结构与系统综述. *绝缘材料*, 2019, 52: 1–8]
- 22 Wang Y Y, Liu Y, Wang S Y, et al. The effect of electrothermal aging on the properties of epoxy resin in dry-type transformer (in Chinese). *Trans China Electrotech Soc*, 2018, 33: 3906–3916 [王有元, 刘玉, 王施又, 等. 电热老化对干式变压器中环氧树脂特性的影响. *电工技术学报*, 2018, 33: 3906–3916]
- 23 González E, Gómez P, Espino-Cortés F P. Analysis of the electric field distribution on insulating supports of dry-type transformers under high temperature. *IET Electric Power Appl*, 2013, 7: 331–337
- 24 Wen M, Song J, Song Y, et al. Reliability assessment of insulation system for dry type transformers. *IEEE Trans Dielect Electr Insul*, 2013, 20: 1998–2008
- 25 Manning M L. Electrical insulation challenge for dry-type transformers. *Insul Circuits*, 1973, 19: 87–92
- 26 Shang K L, Cao J Z, Zhao Z B, et al. Simulation analysis and design optimization of 320 kV HVDC cable joint (in Chinese). *Proceed CSEE*, 2016, 36: 2018–2024 [尚康良, 曹均正, 赵志斌, 等. 320 kV XLPE高压直流电缆接头附件仿真分析和结构优化设计. *中国电机工程学报*, 2016, 36: 2018–2024]
- 27 Yuan C, Xie C, Li L, et al. Space charge behavior in silicone rubber from in-service aged HVDC composite insulators. *IEEE Trans Dielect Electr Insul*, 2019, 26: 843–850
- 28 Zhang S, Fan Y, Lei Q, et al. Insulation structure design and electric field simulation of 500 kV isolation energy supply transformer for HVDC breaker. *High Volt*, 2021, 7: 185–196

补充材料

图S1 海上风电常用的传输并网方式

图S2 高压绕组线圈绕线形式示意图

图S3 变压器漏磁场轴向分布

表S1 硅橡胶关键性能参数

表S2 66 kV/10 MVA升压变压器材料参数设置

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “大容量风电机组用66 kV干式绝缘升压变压器设计”

Design of 66 kV dry-type step-up transformers for large capacity wind turbines

Sheng Zhang^{1*}, Yuan Liu¹, Zhiyuan He¹, Hui Pang¹, Yadong Fan² & Qingquan Lei³

¹ State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209, China;

² School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

³ Institute of Advanced Electrical Materials, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China

* Corresponding author, E-mail: zhangsheng@geiri.sgcc.com.cn

The development of large-scale offshore wind power has become an inevitable trend in the current renewable energy development. Offshore wind power has moved from offshore to deep-sea, and the capacity of wind turbines has reached more than 8 MW. The step-up transformer increases the output voltage of the wind turbine from 0.69–1.4 to 35 kV and above, which is the key equipment of the wind power system.

The deep-sea wind power is more than 50 km away, and the voltage of the step-up transformer needs to be increased to 66 kV and above. At present, the 66 kV step-up transformer for offshore wind power generally adopts oil-immersed transformer technology, and 66 kV step-up transformer with dry-type insulation is a blank product. Oil-immersed step-up transformers have the risk of oil leakage, which may cause fire or explosion accidents, while dry-type insulation step-up transformers have low fire risk, good explosion-proof performance, and new high reliability, and have significant technical advantages in offshore wind power applications. However, limited by the design method and manufacturing process technology, the traditional epoxy casting step-up transformer cannot solve the problem of excessive partial discharge under high voltage, which is caused by high-voltage winding interface defects, restricting the application of this technology in 66 kV step-up transformers.

This paper breaks through the technical limitations of traditional epoxy cast transformers, innovates from the insulation design mechanism, and proposes a new design method for a 66 kV/10 MVA step-up transformer based on silicone rubber insulation. By analyzing the generation mechanism of the interface defect of the epoxy casting transformer's high-voltage winding, a design method of high-voltage insulated shielding wires incorporating semiconducting shielding layers is proposed. The outer conductor of the wire is first wrapped with the semiconducting shielding layer, and then the insulating layer is wrapped. The semiconducting shielding layer and the insulating layer use same base materials. The semiconducting shielding layer can shield the conductor interface defects, the material of the semiconducting shielding layer is designed with the same base material of the insulating layer, so the two layers can be fully compatible, which can effectively suppress the interface defects. According to a certain winding form, the high-voltage insulated shielding wire is wound into a coil structure with a certain number of turns, then integrally cast silicone rubber insulation, forming the overall structure of the high-voltage winding. The high-voltage winding is designed with sheds structure, which increases the creepage distance along the surface, and realizes the high creepage insulation design with a compact height space.

The 66 kV/10 MVA step-up transformer structure is designed, taking into account factors such as insulation, electric field, magnetic field, heat dissipation, and structural strength, etc. The electric field, magnetic field and thermal field of the 66 kV/10 MVA step-up transformer under steady-state operating conditions were analyzed, the electric field distribution characteristics and maximum field strength parameters of the high-voltage winding were obtained, and the magnetic field distribution and thermal field distribution characteristics of the transformer were analyzed. The rationality of the step-up transformer design is verified by multiphysics analysis.

The principle prototype of 66 kV transformers was developed, and AC withstand voltage and partial discharge tests were carried out. Under the test parameters of 55 kV/30 min, the partial discharge amount was less than 5 pC. The terminal-to-ground 120 kV/1 h withstand voltage test was carried out on the high-voltage winding, during the test, partial discharge amount is less than 5 pC, the performance is good, which verifies the feasibility of the design method.

offshore wind power, step-up transformer, insulation structure, silicone rubber main insulation, multiphysics analysis, prototyping

doi: [10.1360/TB-2022-0239](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0239)