[变压器]

大容量集装箱式光伏新能源变压器SFL-9150/33的试制

文/孔凡武
正泰电气股份有限公司

探讨了大容量集装箱式光伏新能源变压器在中东和一带一路地区的应用前景和必要性。介绍了SFL-9150/33型33kV级、双分裂结构、大容量集装箱式光伏新能源变压器研发过程及注意问题。这种变压器能够满足当地高效、便捷的能源供应需求，并帮助降低能源成本，促进可持续发展。

中东和一带一路地区拥有充足的太阳能资源，发展光伏有助于促进当地经济发展。本文研发的大容量集装箱式光伏新能源变压器能够满足当地高效、便捷的能源供应需求，并帮助降低能源成本，促进可持续发展。

中东和“一带一路”国家在变压器和箱式变压器的设计、制造和维护方面，与发达国家存在较大差距，缺乏高水平的专业知识和技术支持，对传统的电力设备依赖较高，需要提升能源技术水平。另外某些国家的经济较为落后，能源投资有限，无法承担高昂的电力设备投资与维护成本，从而限制了新能源的发展。本文研发的大容量集装箱式光伏新能源变压器满足低成本、易维护和好安装等特点，满足当地的新能源变压器的需求。

试制产品的技术参数

正泰公司为贯彻国家“一带一路”的发展要求，促进企业发展，独立研发试制了SFL-9150/33大容量集装箱式光伏新能源变压器。

大容量集装箱式光伏新能源变压器额定容量9 150 kV·A；额定频率60 Hz；电压组合33 000±2×2.5%720 V/720 V；联结组标号Dy11y11；冷却方式ONAN；空载损耗：5 600 W；负载损耗75 000 W；PEI>99.5510%；半穿越短路阻抗≥20%；空载电流0.35；外形要求满足标准20 ft（1 ft=0.304 8 m）集装箱运输要求；表面处理为C5-H；变压器绕制材质为铝。

大容量集装箱式光伏变压器的设计要点

1）结构设计要点。采用高强度钢材制成箱体，外部表面采用C5-H表面处理工艺，以提高防腐蚀能力；紧固件采用不锈钢材质，以保证整个变压器具有良好的耐久性和耐腐蚀性。由于满足20 ft，变压器容量大，高低压套管采用L形布局，低压在短轴，高压在长轴，并采用全绝缘套管，降低体积，满足集装箱要求。

2）绕组材料选择结构。采用铝制绕制材料，成本低，具有良好的导电性能，高压线圈采用层式，低压线圈采用箔式，保证其抗短路能力。

3）考虑逆变器的电压和电流谐波测试报告，以及相应的标准。根据国内和国际标准，考虑逆变器的电压和电流谐波测试报告，设计符合标准的变压器，确保其在实际工作中能够正常运行。对于逆变器运行时产生的电压和电流谐波，进行相应的损耗计算，以确保变压器在实际工作中能够正常运行。

4）考虑空气中阵风和沙尘浓度的影响以及与标

准变压器的设计变化。根据中东和一带一路地区环境特点，采取相应的设计措施，确保变压器在空气中阵风和沙尘浓度的影响下仍然能够正常运行。

5）变压器使用寿命计算。根据实际工作条件和使用环境，计算变压器的使用寿命，制定合理的检修和保养计划，确保变压器安全稳定地运行。

6）短路能力－动态和热短路。进行动态和热短路计算设计，对变压器的短路保护能力进行评估和检测。

由于篇幅有限，分析将重点关注设计要求的关键内容，其他部分简单概述。

1. 变压器整体结构布局

9.15 MW箱式变压器逆变一体是指将箱式变压器和低压柜，高压充气柜和变压器整合的一种集装箱产品，箱式变压器一体机有空间利用率高，方便运输和安装，系统完整性强，可靠性高等优点，但是对变压器油的温升、尺寸等指标有明显的影响。变压器在一个半封闭的空间内，油温明显升高，由于尺寸宽度，高度都有限制，整体布局如图1所示。变压器既要保证可靠性，又要经济性，还要保证效率，在三者之间找到一个平衡点，需要对变压器各个部件进行精细化设计。

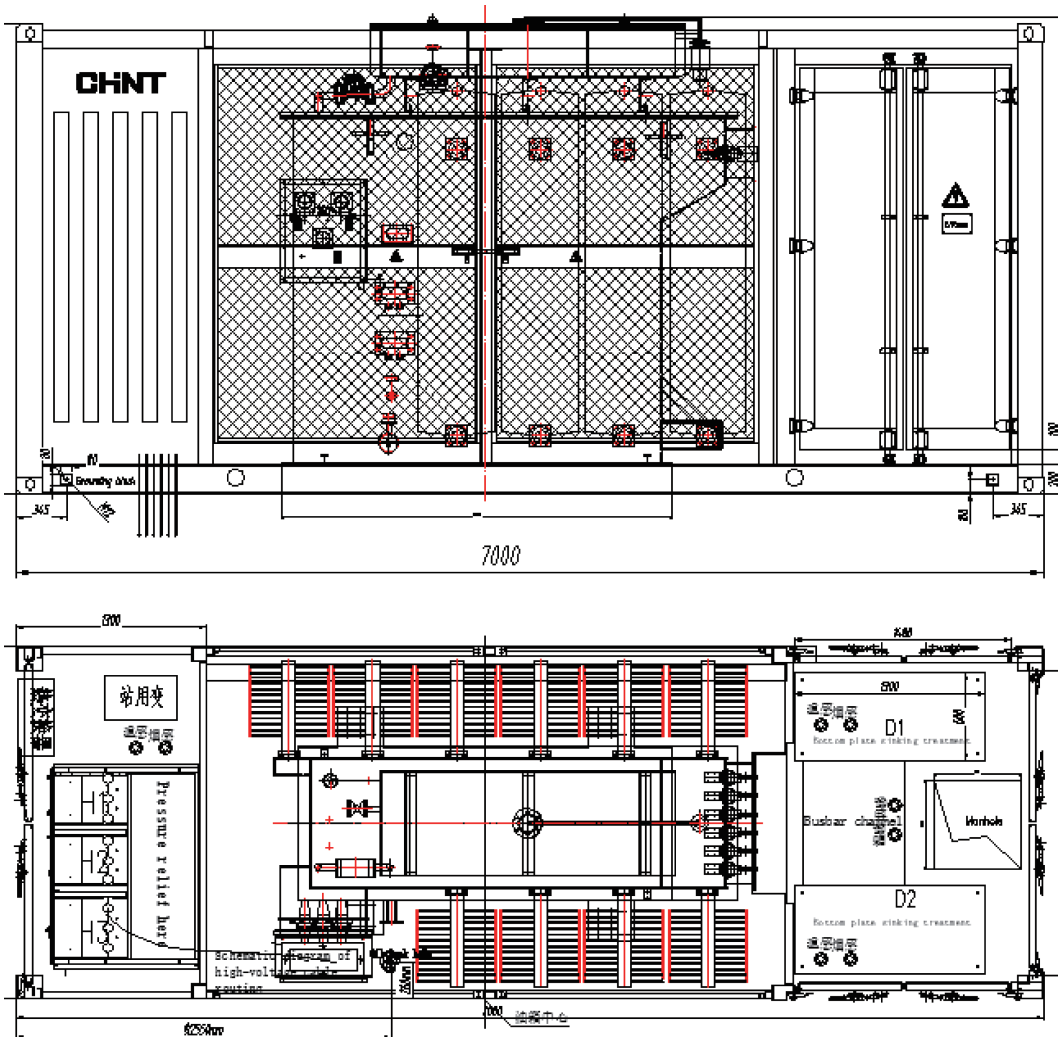


图1　逆变一体机整体布局

1）由于33 kV级的空气电气距离比较大，不能满足集装箱尺寸，高压采用全绝缘套管，缩小整机尺寸；低压套管布置在短轴方向，长轴方向两侧布置片散，宽度方向控制在2 230 mm之内。

2）箱式变压器尺寸带顶和不带顶对变压器的温升要求和外形尺寸是有差异的。根据历史案例数据，逆变一体机箱式变压器带顶影响变压器油面温升12 K以上，不带顶影响变压器温升6 K以上。由

于变压器本体是铝制材质，体积本身就很大，通过计算温升数据，最终和箱式变压器配合，采用不带顶箱式变压器结构。虽然不带顶结构可以给变压器高度方向一定的空间，而且提高了变压器的散热效果，但是综合考虑运输、装配等因素，变压器限高控制在3 050 mm。

3）逆变一体机长度方向控制在7 000 mm，由高压室、变压器和低压室三部分组成，高低压室分别为1 300 mm，低压1 480 mm，考虑到变压器还需要装配空间，最终变压器长度方向限值控制在3 500 mm之内。

2. 变压器器身结构设计注意事项

（1）铁心设计

1）铁心柱形式分为多种形式，本项目采用常规有三相三柱式，铁轭与铁心柱截面积可以相等，也可以不等。此样机按行业常规设计，铁心柱采用最新结构，7级叠积，三相三柱，轭与柱面积相等。

2）为了满足能效的要求，同时考虑系统的谐波因素影响、成本因素等，通过电磁计算，硅钢片选取武钢的23QG95比较合适，磁密设计为1.65 T。

3）铁心夹持结构有大板结构和槽钢结构两种类型，结合公司工艺性、经济性的考量，铁心夹持结构采用槽钢拉螺杆结构，优点是结构简单紧凑，重量相对较轻，强度又能保证。

4）通过仿真分析，铁心夹件在线圈漏磁及低压铜排的影响下，有较大的涡流损耗，如图2所示。对应的措施低压侧夹件采用无磁钢板材质，减少涡流损耗对变压器的影响。

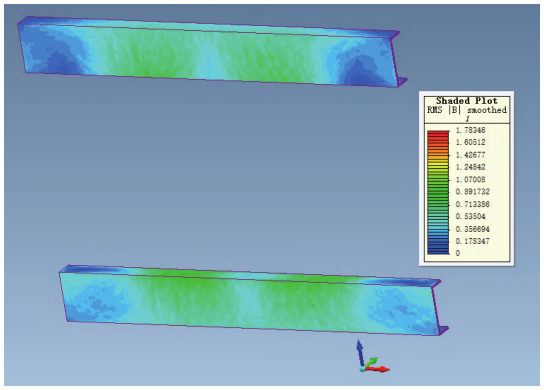


图2　夹件损耗仿真

（2）线圈设计

1）低压线圈结构。低压线圈常规设计有箔式、螺旋和饼式等结构，各有优缺点，由于低压电压低、电流大，从抗短路能力和绕制工艺方面，生产效率方面进行考虑，低压绕组采用箔式结构比较合适，采用箔式结构可以改善绕制工艺，提高生产效率。

低压线圈绝缘材质采用F级DMD绝缘材料，耐高温，有良好的绝缘性能、热稳定性和机械性能等，提高变压器的寿命。

2）高压线圈结构。现在行业内针对9 MW光伏发电用变压器高压多采用饼式绕组，有良好的散热性能，和抗短路能力。另外一个绕组结构是多段圆筒式，多段圆筒式结构相对于饼式结构在结构设计中更能充分利用材料，减少结构重量，具有填充率高，绕制简单，效率高等优势。基于本产品部的工艺设备，和以后批量生产的准备，要求有更高的生产效率和经济性，最终选择多段圆筒式结构，高低压同绕。

此项目变压器寿命设计30年，变压器导线绝缘材质从A级绝缘改为E级绝缘，为此高压线采用热改性纸做绝缘，提供高压线圈结构较高的热稳定性和抗热老化性能。

（3）器身绝缘设计

此产品为双分裂光伏变压器，低压侧带低压断路器保护。由于低压断路器开断电流的限制，导致系统短路电流限值比较大，技术参数上为了满足市场上断路器的开断电流，就需要降低系统短路电流。而实现此目标，需要较大的变压器短路阻抗，所以技术参数表中的半穿越阻抗≥20%。双分裂变压器有轴向分裂和幅向分裂两种形式，在控制半穿越阻抗偏差方面，轴向分裂有明显的制造优势，所以此结构选择轴向分裂。

轴向双分裂较幅向分裂结构上较复杂，高压匝数增加一倍，高低压上下对称布局，铜排上下出线，减少导电排走线空间，降低成本。

作为一种由光伏逆变器馈电的升压变压器，会引起各种谐波，并对瞬态过电压敏感，绕组之间增加静电屏蔽， 静电屏蔽可以有效地减少谐波的传播，并降低电磁干扰的影响。通过在绕组之间加入屏蔽层，可以阻止静电电荷的积累和放电，保证绕组之间的绝缘性能。此项目已经加入了接地屏设计。接地屏放在低压绕组一起绕制，线圈与接地

屏之间布局油道，增加散热面，接地屏通过夹件接地，如图3所示。

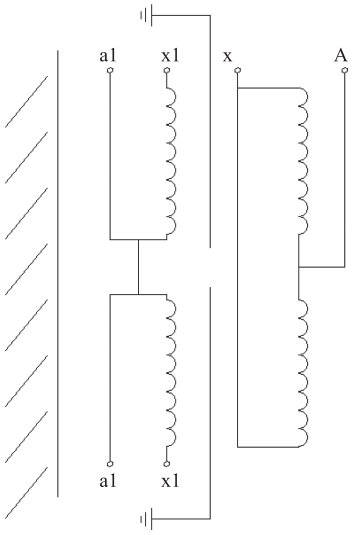


图3　线圈布局结构

（4）引线设计

1）低压引线布局。低压引线导电排上下出线如图4所示，线圈排全部采购铝排，引出到套管的a1，b1，c1，a2，b2，c2路径也是全铝排，套管为铜质材质，铜铝不能直接螺栓连接，通过铜铝过渡片进行过渡，此工艺已经比较成熟。

图4　低压引线

由于铝排路径从长轴走到短轴，距离较长，铝排间有相互作用力，经计算大约2 t，为提高安全性，导电排间距小于400 mm，并且采用20 mm厚层压木作导线夹盖板，增加强度。

2）高压引线布局。高压套管长轴出线，分接开关侧壁引线，高压整体布局如图5所示。高压引线的主要问题为铜铝接头的过渡方式怎么更可靠、高效。常规的方式有焊接和铜铝过渡两种方式。经过多次试制总结，采用铜铝过渡端子既可以提高效率，又能提高可靠性，避免了焊接方式可能存在的高温对导线损伤和外观不美观等问题。

图5　高压引线

3. 油箱总装设计

箱式变压器布局后，变压器外形如图6所示，尺寸已定，长宽高3 500 mm×2 230 mm×3 050 mm，常规配置设计已经无法满足此尺寸。需要从各个模块进行精细化设计。

图6　变压器总装

影响变压器外形尺寸的主要有变压器油箱内尺寸、片散、箱底和储油柜。

将变压器开关设计到侧壁，降低铁心与箱盖之间的距离，同时箱底取消槽钢结构，采用20 mm钢板平底设计，即使如此，变压器按普通设计的高度还是不满足外限尺寸，特此变压器储油柜设计为方形储油柜，降低变压器油箱高度，极限压缩变压器高度，变压器高度控制在3 045 mm。

变压器片散为了满足温升要求，也占有大量空间，常规变压器片散间距为45 mm，为了压缩尺寸，片间距改为40 mm，增加1片，同步的片式散热面经计算需要修正3个点，综合考量还是能提升散热效果，缩小宽度外限尺寸到2 230 mm。

变压器长度方向布局片散，内尺寸不足，通过焊接管道法兰的方式进行解决。

变压器的表面处理采用C5-H的处理级别，满足海运需求。紧固件全部不锈钢处理。变压器保护装置常规配置气体继电器、压力释放阀、油位计、绕组温度计和温控器。

试制过程中碰见的困难及解决方法

1）由于器身绝缘件比重较大，烘干后会出现缩水现象，高压线圈的高度降低，从而导致整体压块无法紧密压实。为了解决这个问题，采取以下处理措施。

对线圈进行烘干，通过烘干线圈，可以将其中的水分蒸发掉，从而减少缩水发生的可能性。

根据线圈的缩水情况，进行设计并调节垫块进行填充。垫块的作用是填补线圈缩水后造成的高度缺失，从而保证线圈的轴向强度。垫块的材料和尺寸根据实际情况进行选择，保证线圈在使用过程中的稳定性和可靠性。

2）铝制导电排容易氧化，导致接触面电阻翻倍。为此，导电排装配前需要打磨，并通过测量每个接触面，保持合格范围一致性。

铝制导电排易氧化导致接触面电阻增加。为了解决这个问题，在导电排装配之前需要进行打磨处理，并通过测量每个接触面的电阻来保证其一致性。

在导电排装配之前，需要对导电排的接触面进行打磨处理。打磨处理去除氧化层，使接触面平整，并提供更好的导电性能。打磨过程应当注意使用适当的工具和材料，避免损坏导电排的表面。

在导电排装配完成后，需要通过测量每个接触面的电阻来确保其一致性。测量方法采用接触电阻测试仪等专业设备来进行，这些设备能够准确地测量接触面的电阻。如果发现某个接触面的电阻明显偏高，可能是由于残留的氧化层或其他污染物造成的，需要重新进行打磨处理直至接触面的电阻符合要求。

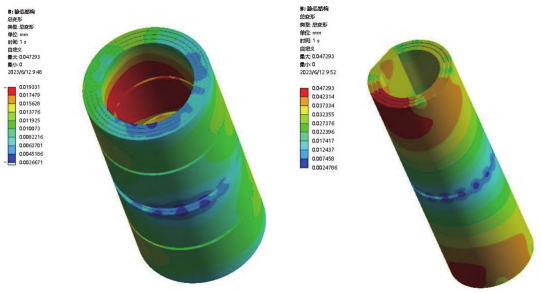
通过对导电排进行打磨处理并确保接触面电阻的一致性，有效防止铝制导电排氧化导致接触面电阻增加的问题，保证导电排的正常导电性能，提高整个系统的可靠性。

3）变压器短路能力的校核。

变压器短路能力是可靠性的关键指标，有必要进行设计校验。如果直接拉到第三方，成本高，研发周期来不及。这边采用的仿真校验方式（基于 Ansys Workbench 2022 R1/ Ansys Electronics Desktop 2022 R1 仿真平台），进行校验。

高压线圈等效应力云图如图7a所示，高压线圈中最大应力为13 MPa，铝的屈服强度80 MPa，占比只有16.2%，有很大的安全裕度，故高压线圈处应力满足要求。

低压线圈等效应力云图如图7b所示，低压线圈最大应力为60 MPa，集中在低压线圈端部位置，铝的屈服强度80 MPa，占比75%，有很大的安全裕度，在安全裕度内。



（a）高压线圈变形量云图　　（b）低压线圈变形量云图

图7　变压器线圈变形量云图

产品试验验证及分析

本文产品在公司试验站按IEC60076-01-211完成了例行试验，进行了全部型式试验（短路测试除外，仿真验证）和特殊试验，性能参数见表1，最终所有试验全部合格。

表1　性能参数

性能	空载	负载	PEI	HV-LV1	HV-LV2	高压温升/K	低压温升（平均）/K	油面温升/K
标准值	5 600	75 000	99.551	≥20%	≥20%	65	65	60
实测值	4 510	73 147	99.603	22.28	21.71	43	57	56

通过对比绕组温升与油面温升，发现与常规的绕组温升高，油面温升低有差异。主要是因为设计绕组油道比较多，电密比较低，又是铝制绕组，有良好的导热性，降低了热点温升，对变压器的寿命有好处。

考虑到变压器使用环境，装配空间，变压器的油面温升是偏高的，低于预期。后续产品考虑到使用场景，通过在短轴方向增加片散数量，保证外限尺寸不变，降低油面温升到54 K之下，提高产品可靠性。

试制结论

此次变压器试制从可靠性、经济性和效率等方面综合考虑，致力于满足市场的最新需求并积极抢占市场份额。通过运用仿真工具和经验数据等多种手段，成功试制了一种可靠的大容量逆变一体机光伏新能源变压器。

在试制过程中，发现了一些可改进的空间。诚挚地希望得到专业人士的指正和建议，以便改进产品的设计和技术，提高可靠性和性能。

总之，在设计试制过程中，特别注重综合考虑各项关键参数的设计。重点关注了变压器的基本性能参数、短路能力、温升设计、寿命改善和尺寸控制等关键参数的设计，以及其他光伏谐波、防风沙和太阳光辐射等因素对变压器的影响。通过克服生产工艺中的多种问题，成功试制出了符合要求的产品，为之后的批量生产总结了经验，奠定了良好的基础，为进军国际市场做好了充分准备。**EA**

（收稿日期：2023-08-10）

参考文献

[1] 路长柏，朱英浩，电力变压器计算[M]．哈尔滨：黑龙江科学技术出版社，1990．

[2] 沈阳变压器研究所．变压器设计手册[M]．1985．09，1～171．

[3] IEC 60076-1：2011电力变压器 第1部分：总则．

[4] IEC 60076-2：2011电力变压器 第2部分：液浸变压器的温升．

[5] IEC 60076-5：2006 电力变压器 第5部分：承受短路的能力．