

70kV 级直线变压器驱动源 (LTD) 模块的紧凑化与绝缘研究

李少鹏¹ 费香邦²

上海航天电子技术研究所 201108

【摘要】直线变压器驱动源 (LTD) 是脉冲功率技术领域的主要器件, 在惯性约束聚变、Z 箍缩和高功率微爆等重大的工程中有不可替代的作用。70kV 级 LED 模块是其中低电压等级 LTD 装置的基础单元, 其紧凑化的程度和绝缘性都会直接地决定整机装置的功率密度和体积规模及运行中的可靠性。文章针对现有的 70kV 级的 LTD 模块体积偏大及绝缘裕度不足等问题进行研究, 期望能够给 70kV 级的 LTD 模块小型化和高可靠化提供更多的理论支持和技术参考。

【关键词】70kV 级; 直线变压器驱动源; 紧凑化设计; 绝缘特性

Compact and Insulation Study of 70kV Linear Transformer Driver (LTD) Module

Li Shaopeng¹ Fei Xiangbang²

Shanghai Institute of Aerospace Electronics Technology 201108

【Abstract】Linear Transformer Driver (LTD) is a major component in the field of pulse power technology, playing an irreplaceable role in major engineering projects such as inertial confinement fusion, Z-pinch, and high-power microblasts. The 70kV LED module is the basic unit of the low voltage level LTD device, and its compactness and insulation directly determine the power density, volume scale, and reliability of the entire device during operation. The article focuses on the problems of large volume and insufficient insulation margin of existing 70kV LTD modules, hoping to provide more theoretical support and technical references for the miniaturization and high reliability of 70kV LTD modules.

【Key words】70kV class; Linear transformer drive source; Compact design; Insulation characteristics

脉冲功率技术是把低功率和长时间的电能转换为高功率且短脉冲的电能的主要技术, 其广泛地应用在能源开发和材料科学等领域中。LTD 作为县一带的脉冲功率装置的核心拓扑, 通过其模块化、扩展和高功率密度等的优势, 逐渐地取代了传统的 Marx 发生器和脉冲的形成线, 成为大型脉冲功率装置的首选技术方案。70kV 级 LTD 模块作为中低电压等级的 LTD 装置的最基础的组成单元, 其性能指标会直接影响整机装置的综合性能。

现阶段, 现有的 70kV 级别的 LTD 模块均存在体积偏大的情况, 其主要的原因是因为磁芯的选择比较保守、开关的单元和传输的线路布局较为分散, 使得模块空间的利用率比较低; 除此之外, 紧凑化的设计会导致内部绝缘距离被缩短, 电场也会因此而集中, 进一步的恶化绝缘的性能, 从而形成“紧凑化和绝缘性相互制约”的现实矛盾。所以, 进行 70kV 级 LTD 模块的紧凑化和绝缘协同的优化研究, 解决二者之间存在的制约关系, 有着非常重要的意义。

一、70 kV 级 LTD 模块的结构与工作原理

(一) 模块结构组成

一个典型的 70kV 级的 LTD 模块由初级储能单元、开关单元、磁芯和绕组单元、次级传输单元和外壳等部分组成。其中, 初级储能单元使用电容器组, 主要用来存储电能并给模块提供初始的能量; 开关单元一般选择气体开关或者半导体开关, 以此实现初级回路的快速通和断, 并控制能量的实

际释放时机; 磁芯和绕组单元是 LTD 模块的核心电磁感应组件, 初级绕组和次级绕组绕制于磁芯之上, 借助电磁感应来实现电压的提升和能量的传输; 次级传输单元主要用来把感应锁产生的高压脉冲传输到负载中; 外壳则主要起到机械支撑和密封及防护的作用, 给内部的相关部件提供一个绝缘的环境^[1]。

传统的 70kV 级 LTD 模块为了保证有最好的绝缘性能, 在各个部件之间会预留一定的绝缘距离, 而且使用的是分散式的布局, 使得模块的体积偏大, 一般的尺寸为 1.2m × 0.8m × 0.6m, 重量常常超过 200kg, 很难满足移动平台的实际需求。除此之外, 粗心也会选择传统的环形硅钢片的磁芯, 体积比较大且能耗较高, 都从不同角度制约了模块紧凑化的发展。

(二) 工作原理

70kV 级 LTD 模块在工作中是基于电磁感应的原理, 其主要分为储能阶段、放电阶段和能量传输阶段。在储能阶段中, 外部的电源借助充电回路给初级的储能电容器组充电, 直到达到预设的电压; 此时开关单元处于断开的状态, 初级的回路没有电流, 磁芯中也没有磁场产生; 在放电阶段中, 开关单元在接收到触发信号之后会快速的闭合, 初级储能电容器组会借助开关单元和初级绕组形成放电电路, 从而产生高频脉冲的电流; 高频脉冲电流借助初级绕组在磁芯中激发变化的磁场, 按照电磁感应定量, 次级绕组中会得到感应并产生高压的脉冲电动势。在能量的传输阶段中, 次级绕组会产生高压脉冲借助次级传输单元上传到负载, 完成低功率电能向高功率脉冲电能的转换^[2]。

在这样的过程中,模块的绝缘性会直接地影响到能量传输的效率和运行的可靠性。当模块的内部绝缘的结构没有办法承受工作所产生的电压时,可能会出现绝缘击穿的情况,使得初级与次级回路短路,不仅会损坏模块内部的相关部件,也会影响到整体 LTD 装置的正常运行。所以,在紧凑化的设计中,必须保证模块绝缘性能够满足工作的实际要求。

二、70 kV 级 LTD 模块的紧凑化设计

(一) 紧凑化设计目标与制约因素

70kV 级 LTD 模块在紧凑化方面的设计目标就是要在保证模块输出参数和运行可靠性的基础上,最大程度地缩减模块的体积和重量,保证模块的尺寸不能超过 $0.8\text{m} \times 0.6\text{m} \times 0.4\text{m}$,且重量要控制在 10kg 之内。

制约紧凑化设计的因素有两个方面,首先,电磁兼容性的需求,模块之内的各个部件之间存在着电磁耦合,紧凑化的布局可能会导致电磁干扰的加剧,从而影响模块的正常工作。其次,绝缘性的要求,紧凑化的设计会缩短各个部件之间的绝缘距离,使得电场集中现象严重,增加了绝缘击穿的风险^[9]。所以,紧凑化的设计需要综合地考虑电磁兼容性和绝缘性,最终实现多个目标的协同优化。

(二) 拓扑结构优化

传统的 70kV 级 LTD 模块使用单初级-单次级的拓扑结构,初级绕组和次级绕组分别绕制于一个独立的磁芯之上,结构较为分散,空间的整体利用率比较低。为了实现紧凑化的设计,文章使用了一种集成式的拓扑结构,把初级绕组和次级绕组一同绕制在一个磁芯之上,使用分段绕制的方法,减少磁芯的数量和体积。与此同时,优化初级储能单元的拓扑,使用多电容并联的储能方法,减少电容器组的实际占用空间。

借助 PSpice 仿真软件对传统拓扑和集成式的拓扑开展仿真比较,结果显示,集成式拓扑在保证输出电压 70kV、脉冲的宽度在 100ns 的基础上,磁芯的体积缩减了 40% 左右,初级储能单元所占用的空间也缩减了 35%,模块整体的体积初步缩减了 25%。集成式的拓扑还可以减少电磁耦合的实际路径,在降低电磁干扰的基础上,提升模块的电磁兼容性。

(三) 关键部件小型化设计

1. 磁芯小型化

磁芯是 LTD 模块的主要部件之一,它的体积和性能都会直接地影响到模块的紧凑化程度和能量的转换效率。传统的 70kV 级 LTD 模块使用环形硅钢片的磁芯,饱和磁通密度比较低,体积也比较大。文章选择纳米晶合金磁芯来代替传统磁芯材质,纳米晶合金材料有着饱和磁通密度较高、磁导率高且能耗较低等的优势,可以凭借较小的体积实现较高的磁通量。

按照 70kV 级 LTD 模块的实际工作参数,借助磁路来计算并确定磁芯的相关关键参数,具体为:磁芯的截面面积为 0.12m^2 ,磁芯的平均磁路长度为 0.8m,选择的尺寸为 $\Phi 400\text{mm} \times \Phi 200\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的环形纳米晶合金磁芯。其和传统

的硅钢片磁芯相比较,纳米晶合金磁芯体积缩减了 45%,能耗降低了 30%,大幅度提升了模块的紧凑化程度和能量转换的效率。

2. 开关单元集成化

传统的 70kV 级 LTD 模块使用分散式的开关布局,每一个开关单元都需要独立地安装,占用的空间比较大。文章使用了集成化的开关设计方案,把多个气体开关集成在一个绝缘基座之上,借助共用触发回路和散热结构,减少开关单元的实际占用空间。榆次痛死,选择小型化的气体开关,其外形的尺寸选择为: $\Phi 80\text{mm} \times 120\text{mm}$,和传统的气体开关相比较,体积缩减了 50%。集成化的开关单元在绝缘基座的材料选择上,选择了环氧树脂,借助有限元仿真优化基座的结构设计,保证开关之间和地之间的绝缘性能。

3. 传输线路一体化

传统的 LTD 模块在次级传输线路上使用独立的同轴电缆或者金属波导,连接的位置比较多,占用的空间也比较大。文章使用一体化的传输线路设计,把次级绕组和传输线路集成在一个绝缘结构中,传输线路使用微带线结构,直接地作用于绝缘基板之上,减少连接的位置,提升空间的实际利用率。微带线传输线路的特性阻抗设计为 50Ω ,借助 HFSS 仿真软件优化微带线的宽度和厚度,以此保证传输线路的传输效率和阻抗匹配的性能。

(四) 空间布局优化

在拓扑优化和部件的小型化基础之上,使用三维空间布局优化方式,把初级储能单元、集成化开关单元、磁芯和绕组单元、次级传输单元等部件,按照电磁兼容性和绝缘的要求开展分层的布局。初级储能单元和集成化开关单元布置在模块的下部,磁芯和绕组单元布置在模块的中部,次级传输单元布置在模块的上部,各个层级之间使用绝缘隔板来分隔,以此保证绝缘的性能。

借助 Solid Works 软件创建模块的三维模型,开展空间干涉检查和体积的计算。相关结果表示,优化之后的 70kV 级 LTD 模块的尺寸为 $0.75\text{m} \times 0.55\text{m} \times 0.38\text{m}$,体积为 0.156m^3 ,和传统的模块体积 (0.576m^3) 比较缩减了 73%,重量控制在了 110kg 之内,满足了紧凑化的设计需求。

三、70 kV 级 LTD 模块的绝缘特性研究

(一) 绝缘薄弱环节分析

在紧凑化设计之后,70kV 级 LTD 模块内部的绝缘距离被缩短,电场的分布也更为复杂,容易出现电场集中的情况,从而形成绝缘的薄弱环节。借助电场仿真分析,来确定模块之内的主要绝缘薄弱环节为:绕组绝缘、磁芯和绕组之间的气隙绝缘、沿面绝缘。

使用 ANSYS Maxwell 软件创建模块内部的三维电场仿真模型,并施加 70kV 的工作电压,以此分析各个位置的电场分布。仿真的结果表示,绕组端部的电场强度最大值为 32kV/mm ,磁芯和绕组之间气隙的电场强度最大值为 45kV/mm ,绝缘隔板之上的电场强度的最大值为 28kV/mm ,都较为接近或者超过对应绝缘材料的击穿场强,需要针对性

地开展绝缘优化设计。

(二) 绝缘材料选型

针对模块内部不同的绝缘薄弱环节,结合工作环境与性能要求,选用适配的绝缘材料:

1.绕组绝缘材料:选择聚酰亚胺材料的薄膜,这一材料有着耐高温、耐辐射且击穿场强较高等的优势,适合用在绕组的匝间绝缘和对地的绝缘。为了提升绝缘性能,使用聚酰亚胺材料的薄膜和 Noex 纸复合的绝缘结构,复合绝缘结构的击穿场强可以达到 50kV/mm。

2.气隙绝缘材料:磁芯和绕组之间的气隙使用 SF₆ 气体进行绝缘,该气体有着非常好的绝缘性能和灭弧性能,击穿场强可以达到 80kV/mm (0.1 MPa)。借助密封的设计,会把气隙之内的 SF₆ 气体的压力控制在 0.2MPa,此时,击穿场强会达到 120kV/mm,可以有效地提升气隙的绝缘性能。

3.沿面绝缘材料:绝缘隔板选择使用环氧玻璃布层压板,这一材料有着机械强度较高、绝缘性能较好等的优点。为了降低沿面的电场强度,在绝缘隔板的表面会涂一层 PTV 的硅橡胶涂层,这一材料有着非常好的憎水性和耐污性,可以显著地提升沿面的闪络电压。

(三) 绝缘结构优化设计

1.绕组绝缘结构优化

针对绕组端部电场较为集中这一情况,使用阶梯式的绕组端部结构,借助增加绕组段和绝缘距离及采用均压环,来改善电场的实际分布情况。均压环使用铜质的材料,尺寸为 $\Phi 150\text{mm} \times 20\text{mm}$,安装在绕组的端部。借助电场仿真优化均压环的形状和实际的安装位置,保证绕组端部的电场强度能够均匀地分布。

仿真的结果表示,优化之后的绕组端部电场强度最大值下降到了 22kV/mm,低于复合绝缘结构的击穿场强,电场在分布的均匀性上也有所提升,解决了绕组绝缘薄弱这一问题。

2.气隙绝缘结构优化

为了改善磁芯和绕组之间气隙的电场分布,在气隙之内设置绝缘隔板,把气隙分布在多个小间隙中,使用“气隙+固体绝缘”这样的复合绝缘结构。绝缘隔板的材料在选择上使用环氧玻璃布层压板,厚度为 2mm,均匀地布置在气隙之内。借助电场的仿真分析,复合绝缘结构可以有效地分散电场的强度,保证气隙之内的电场强度最大值下降到 35kV/mm,低于 SF₆ 气体在 0.2MPa 压力之下的击穿场强(120 kV/mm)。

3.沿面绝缘结构优化

对于绝缘隔板表面的沿面放电这一问题,除了涂 PTV 硅橡胶涂层之外,也使用了伞裙的结构设计,以此增加沿面的放电距离。伞裙结构的伞裙数量为 6,间距为 15mm,高度为 10mm。借助沿面电场仿真来优化伞裙的形状和尺寸,保证沿面电场的强度能均匀地分布。仿真的结果表示,在优化之后的绝缘隔板表面的电场强度最大值下降到了 18kV/mm,沿面闪络电压提升到了 120kV,高于模块的实际工作电压 70kV,满足沿面绝缘的实际要求。

(四) 绝缘性能测试

为了验证 70kV 级 LTD 紧凑化模块的绝缘性能,创建了绝缘测试平台,并进行相关的耐压测试、局部放电测试和沿面闪络测试。

1.耐压测试

耐压测试使用直流耐压和冲击耐压结合的方式。直流耐压测试电压为 105kV,保持的时间为 1min;冲击电压测试使用标准的雷电冲击电压,峰值的电压为 175kV。测试的结果表示,模块在直流耐压和冲击耐压测试中均没有出现击穿和闪络的情况,绝缘的性能比较稳定。

2.局部放电测试

局部放电的测试使用超声波和特高频联合检测的方式,测试的电压为 70kV,测试的时间为 30min。测试的结果表示,模块内部的局部放电最大值为 3.2pC,低于 GB/T16927.1-2011 所规定的限值,这也说明模块之内的绝缘结构设计较为合理,不存在显著的绝缘缺陷。

3.沿面闪络测试

沿面闪络测试在不同的湿度环境之下开展,相对湿度为 40%、60%和 80%,侧测试的电压为 70kV。测试的结果表示,在不同的湿度之下,绝缘隔板的表面均没有闪络的情况,沿面绝缘性能较为稳定,能够适应不同的工作环境。

结束语

文章围绕 70kV 级 LTD 模块的紧凑化和绝缘协同优化进行研究,借助拓扑结构集成和关键部件及空间布局的优化,把模块体积缩减了 73%,重量控制在了 110kg 之内,实现了紧凑化的设计目标。在此基础上,针对紧凑化所带来的绝缘问题,借助薄弱环节分析、适合材料选择及结构优化等,结合耐压、局部放电等的测试开展验证,保证模块绝缘性能的稳定,给中低压 LTD 模块的小型化和高可靠应用提供更多的技术支持。

参考文献

- [1]李响,周伟康,王坤.一种 ± 5 kV 双极性直线型变压器驱动源设计及其在电穿孔中的应用[J].强激光与粒子束, 2025, 37(01): 95-101.
- [2]文振明,王志国,吕明辉,等.直线变压器驱动源模块中自放电气体火花开关绝缘恢复的研究[J].高电压技术, 2025, 51(02): 686-697.
- [3]万臻博,丁卫东,孙凤举.直线变压器驱动源磁芯磁化过程的仿真研究[J].高电压技术, 2024, 50(04): 1792-1800.