

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.008

PET 中双屏蔽绝缘壳体关键部位的电场分析与优化

周 伟, 谢毅聪, 张伟强

(台达电子企业管理(上海)有限公司台达电力电子研发中心, 上海 201209)

摘要: 随着电压等级的提升,电力电子变压器(PET)中电力电子器件的绝缘问题日益突出,如果不采取有效的隔离防护措施,会发生严重的局部放电,局放长期作用会导致绝缘击穿失效,影响电气设备的正常运行及人员的安全。为此,文中设计一种双屏蔽绝缘壳体,该绝缘结构既可以抑制中、高压模块内部的电力电子器件尖端产生的局部放电,又可以缩减绝缘距离,实现紧凑布局,同时也为操作人员提供安全保障。文中建立了双屏蔽绝缘壳体的等效模型,通过仿真与实验相结合的方法对电场进行计算、对电性能进行分析,确定了影响局部放电特性的关键部位,即金属网端部的形状和喷锌层末端的结构形式。通过采用喷锌层端部造圆弧和开凹槽两种优化措施,提高双屏蔽绝缘壳体的局放电压水平。

关键词: 电力电子变压器;局部放电;双屏蔽绝缘壳体;关键部位;喷锌层端部

Electric Field Analysis and Optimization of Key Parts of Double Shielded Insulation Shell in PET

ZHOU Wei, XIE Yicong, ZHANG Weiqiang

(Delta Power Electronics Center, Delta Electronic (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201209, China)

Abstract: With the improvement of voltage level, the insulation problem of power electronic devices in power electronic transformer (PET) is becoming increasingly prominent. If effective isolation and protection measures are not taken, serious partial discharge will occur. Long-term partial discharge will lead to insulation breakdown failure, which will affect the normal operation of electrical equipment and the safety of personnel. Therefore, a double shielded insulation shell is designed. The insulation structure can not only suppress the partial discharge generated by the power electronic device tips in the medium and high voltage modules, but also reduce the insulation distance to achieve compact layout, and also provide safety guarantee for operators. The equivalent model of the double shielded insulation shell is established. The electric field is calculated and the electrical performance is analyzed by combining simulation and experiment. The key parts that affect the partial discharge characteristic are determined, that is, the shape of the end of the metal mesh and the structure of the end of the zinc-sprayed layer. The partial discharge voltage level of the double shielded insulation shell is improved by using two optimization measures: making arc and building groove at the end of the zinc-sprayed layer.

Key words: power electronic transformer; partial discharge; double shielded insulation shell; key part; end of zinc-sprayed layer

0 引言

随着云计算的飞速发展,数据中心市场规模的不断扩大,大功率的电力电子变换装置得到了广泛的应用。电力电子变压器(power electronic trans-

former, PET)在数据中心的供电系统架构中发挥着重要作用,其需求量也在逐年递增。PET通常是指通过高频变压器和电力电子技术实现的新型变换设备,一般应用在中、高压大功率的系统中,与传统意义上的工频变压器相比较,系统功能更加丰富、

系统的可控性与可靠性进一步提高^[1-10]。

在中、高压的用电条件下,设备的绝缘防护是系统安全可靠的重中之重。从低压到中、高压的发展,不仅仅是电压等级的提升,电力电子元器件的尺寸,不同带电体之间的电气间隙和爬电距离都随之增加,导致系统的体积和重量也随之增大,同时局部放电的处理难度也随之提高^[11-13]。文中设计的双屏蔽绝缘壳体,采用高介电强度的绝缘材料,内嵌金属丝网,对高场强区域进行屏蔽处理,抑制了局部放电,缩减了绝缘距离,使空间布局更加紧凑。

下面通过仿真与试验相结合的方式,对双屏蔽绝缘壳体关键设计结构的电场进行分析与研究,并提出优化改进措施,效果显著。

1 PET中的绝缘结构

在中压三相系统中,PET由 N 个单元(Cell)串联组成,每个Cell承受的电位各不相同,顶层Cell具有最高电位见图1、2,系统中多处都面临着绝缘方面的挑战:

- 1)相与相之间的绝缘;
- 2)Cell之间的绝缘;
- 3)中压电路与高频变压器低压侧之间的绝缘;
- 4)中压电路与低压电路之间的绝缘;
- 5)高频变压器高压侧与低压电路之间的绝缘。

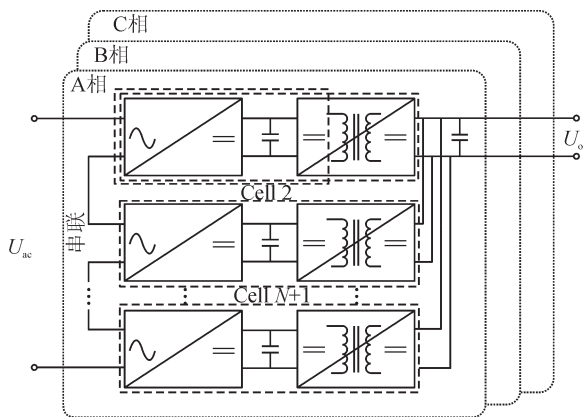


图1 PET的三相系统布局

Fig. 1 Three-Phase system layout of PET

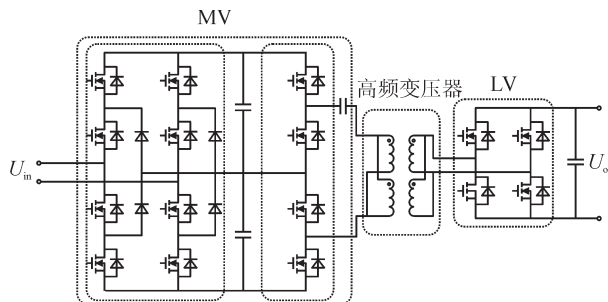
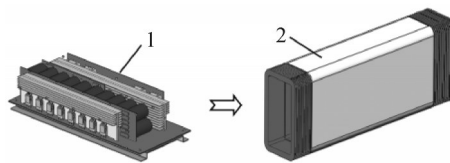


图2 PET中单个Cell的拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of a single Cell in PET

为了满足中压三相系统绝缘隔离的要求,不同带电导体之间需要提供必要的绝缘防护,包括符合安规要求的电气间隙、爬电距离、工频耐压和局部放电等。

在保证良好绝缘的前提下,实现系统的紧凑布局,依靠空气绝缘很难达到这一要求,文中采用固体绝缘的双屏蔽结构,将电力电子器件放置于固体绝缘壳体中,绝缘壳体内部嵌金属屏蔽网,用于屏蔽腔内高压器件的尖端结构,外表面采用喷锌涂层,可以实现安全可靠的接地保护,见图3。



1—高压功率模块; 2—双屏蔽绝缘壳体。

图3 双屏蔽绝缘壳体

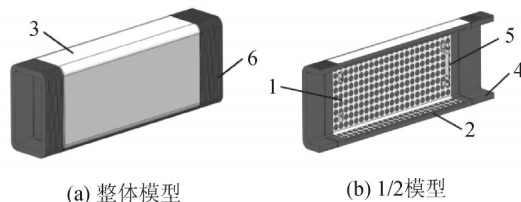
Fig. 3 Double shielded insulation shell

2 双屏蔽绝缘壳体的设计

2.1 模型建立

双屏蔽绝缘壳体主要由4部分组成,分别是钣金件、屏蔽网、环氧树脂绝缘层及喷锌层,见图4。它们的作用分别是:

- 1)钣金件用于安装固定、支撑中/高压模块;
- 2)屏蔽网用于屏蔽中/高压模块的尖端,防止屏蔽壳体内部发生局部放电;
- 3)喷锌层提供了可靠的接地措施,减小了壳体之间的电气间隙及爬电距离,便于实现紧凑布局;
- 4)环氧树脂绝缘层是利用树脂本身的高介电强度,提高整体的耐压及局放水平。



(a) 整体模型

(b) 1/2模型

1—钣金件; 2—屏蔽网; 3—喷锌层; 4—环氧树脂绝缘层; 5—固定/安装点; 6—伞裙。

图4 双屏蔽绝缘壳体的结构组成

Fig. 4 Structure composition of double shielded insulation shell

为了便于分析双屏蔽绝缘壳体的电场分布情况,提高计算效率,将此三维结构等效为二维模型进行处理,见图5。

等效处理时作出以下假设:

- 1)绝缘壳体的内腔钣金件表面无凸起或尖端等结构,按照平板进行处理;

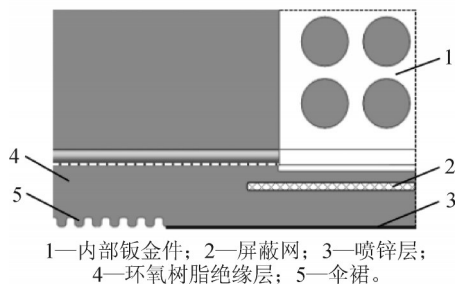


图5 二维等效模型

Fig. 5 Two-dimensional equivalent model

- 2)环氧树脂内部无气泡或裂纹,树脂与屏蔽网之间结合良好,无剥离;
- 3)绝缘壳体外表面的喷锌层端部整齐、厚度一致且无漏喷区域。

2.2 仿真分析

内部钣金件和屏蔽网等电位连接,施加高电位(RMS)27.0 kV,外表面的喷锌层接地处理,施加零电位,电位及电场强度分布见图6、7。

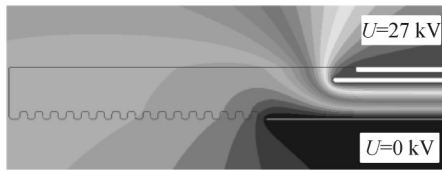
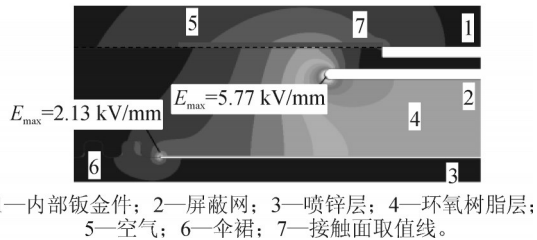


图6 电位分布云图

Fig. 6 Cloud map of electric potential distribution



1—内部钣金件; 2—屏蔽网; 3—喷锌层; 4—环氧树脂层; 5—空气; 6—伞裙; 7—接触面取值线。

图7 电场强度分布云图

Fig. 7 Cloud map of electric field intensity distribution

电场强度的集中区域出现在屏蔽网的端部,电场强度的最大值为 5.77 kV/mm,低于环氧树脂本身发生局部放电的临界场强值 8.0 kV/mm,这个判据只针对当前结构或相似结构的产品,通过多台样件的实测结果总结得到,考虑了工艺对电气性能的影响。在实际生产中发现,方筒型屏蔽网的加工难度大,端部结构处理的工艺复杂,装配尺寸的精度要求高,多种因素共同作用,增加了设计的难度和不确定性。

喷锌层端部的区域是 3 种材料的交界面,即空气、金属喷锌层和环氧树脂,由于空气的介电强度远低于环氧树脂材料,导致大部分的电压都集中在喷锌层和环氧树脂层表面的空气区域^[14]。通过计算,喷锌层端部的场强为 2.13 kV/mm,高于空气中

发生局部放电的临界场强值 2.0 kV/mm(该值为有效值,考虑环境的影响,临界场强设置为 2.0 kV/mm)^[15-16],未满足无局放设计的要求。

在环氧树脂与空气的接触面上取 N 个点,提取每个点的电场强度值,接触面取值线见图 7。通过 N 点的取值,得到电场强度的阶梯分布,见图 8。靠近屏蔽网端部接触面上的场强值最大,为 1.28 kV/mm,低于空气产生局放的临界场强 2.0 kV/mm,环氧与空气接触面上不会发生局部放电。

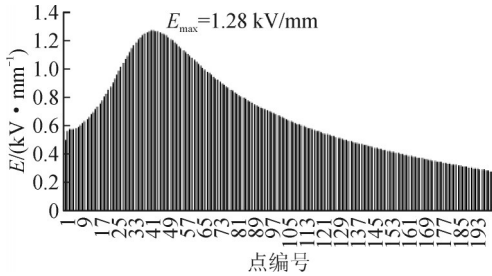


图8 环氧树脂层与空气交界面处的电场强度

Fig. 8 Electric field intensity at the interface between epoxy and air

不同位置处的电场强度仿真值见表 1。除了喷锌层端部的场强超出空气无局放的临界场强外,其余局部区域内的场强均满足设计的要求。

表1 不同位置处的电场强度仿真值

Table 1 Simulation value of electric field intensity in different position kV/mm

局部位置	丝网端部	喷锌层端部	交界面	钣金件端部
最大场强	5.77	2.13	1.28	1.27
判据	8.00	2.00	2.00	2.00

通过电场强度仿真值对局放电压进行反推,当喷锌层端部的场强值等于空气无局放的临界场强 2.0 kV/mm 时,经过计算,此时的局放电压为 25 kV,即此产品在低于 25 kV 时,不会发生局部放电。以下通过试验对此仿真值进行验证。

3 双屏蔽绝缘壳体的测试

对双屏蔽绝缘壳体进行电气性能试验,主要包括 1 min 工频耐压、局部放电起始电压和熄灭电压,见图 9。试验时,内腔未放置功率模块。

在 3 种不同条件下对双屏蔽绝缘壳体的电气性能进行测试,分别为:

- 1)在空气介质中进行测试;
- 2)双屏蔽绝缘壳体的内腔充满 SF₆ 介质,其余部分暴露于空气介质中;
- 3)在 SF₆ 介质中进行测试。

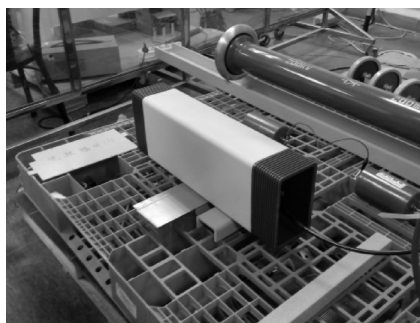


图9 双屏蔽绝缘壳体现场测试

Fig. 9 Field test of double shielded insulation shell

3.1 空气介质中测试

在空气介质中进行测试,见表2。从表2的结果可以看出,双屏蔽绝缘壳体的局部放电熄灭电压普遍偏低,分析其原因是由于内腔安装点存在尖端,或者内腔有金属杂质,发生了尖端放电,降压过程中放电电弧难以熄灭,导致熄灭电压偏低。

表2 电性能测试结果

Table 2 Electrical performance test results

编号	测试介质	起始电压/kV	熄灭电压/kV	47 kV@1 min 工频耐压
RA-01	AIR	19	14	通过
RA-02	AIR	20	17	通过
RA-03	AIR	21	14	通过
RA-04	AIR	18	12	通过
RA-05	AIR	19	12	通过

双屏蔽绝缘壳体的内腔安装点用于高压模块的固定,见图10。当高压模块完全推入壳体的内腔后,模块会覆盖所有的安装点,这种安装方式解决了安装点尖端放电的问题。

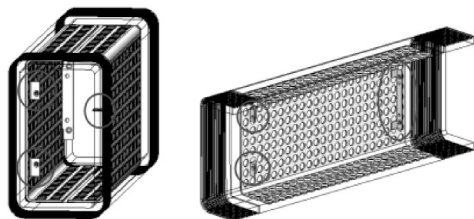


图10 双屏蔽绝缘壳体的内腔安装点

Fig. 10 Installation points inside double shielded insulation shell

3.2 内腔SF₆介质,其余部分空气

当内腔充满SF₆气体,其余部分为空气时,电性能测试结果见表3。此工况考察的是喷锌层端部和屏蔽网端部的集中电场对产品电气性能的影响,测试工况与仿真参考条件保持一致,用于验证仿真计算方法的正确性。

表3 电性能测试结果

Table 3 Electrical performance test results

编号	测试介质	起始电压/kV	熄灭电压/kV	47 kV@1 min 工频耐压
RA-01	内腔SF ₆	24	24	通过
RA-02	内腔SF ₆	25	22	通过
RA-03	内腔SF ₆	26	24	通过
RA-04	内腔SF ₆	23	23	通过
RA-05	内腔SF ₆	23	22	通过

局部放电的起始电压和熄灭电压均得到提高,熄灭电压提高的幅度最大,说明内腔结构件尖端放电对局放电压的提升有直接影响,需加以关注,引起重视。

表3中5个样品局部放电起始电压的平均值为24 kV,熄灭电压的平均值为23 kV,局放电压的仿真值为25 kV,与测试结果的一致性较好,误差小,误差控制在10%以内。

3.3 SF₆介质中测试

双屏蔽绝缘壳体的外表面作喷锌处理或喷涂其他导电漆,使其外表面具备可靠接地从而达到人体可触及的程度。但在实际生产和测试中发现,接地后的喷锌层的端部,电场强度集中,如果不采取优化改进措施,对空气极易发生放电,降低喷锌产品的局放电压水平^[17-20]。

为了评估喷锌层端部的场强集中问题对喷锌产品局放电压的影响程度,将产品完全放入SF₆介质中进行测试,测试结果见表4。不同测试条件下起始电压与熄灭电压的对比曲线见图11、12。

表4 电性能测试结果

Table 4 Electrical performance test results

编号	测试介质	起始电压/kV	熄灭电压/kV	47 kV@1 min 工频耐压
RA-01	SF ₆	30	26	通过
RA-02	SF ₆	33	29	通过
RA-03	SF ₆	30	25	通过
RA-04	SF ₆	40	40	通过
RA-05	SF ₆	38	33	通过

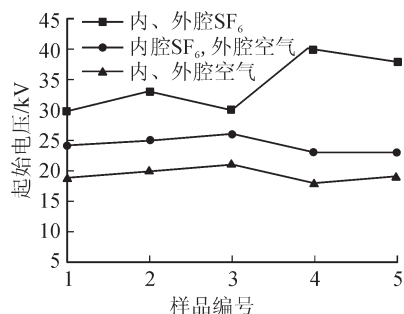


图11 不同介质下的局放起始电压

Fig. 11 Partial discharge initial voltage in different dielectric

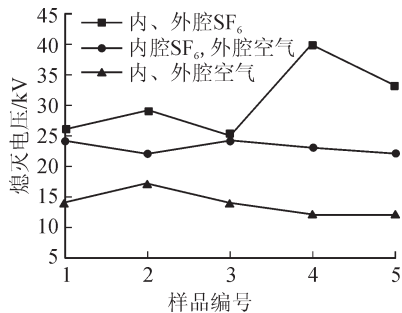


图 12 不同介质下的局放熄灭电压

Fig. 12 Partial discharge extinction voltage in different dielectric

实验结果表明:当绝缘壳体完全放入 SF₆ 介质中进行局部放电测试时,局放起始电压和熄灭电压均有明显的提高,最高电压值可以达到 40 kV,但样品编号为 RA-01 和 RA-03 的熄灭电压并没有得到提升,主要原因是由于屏蔽网端部结构工艺处理不合格,导致局放熄灭电压难以提升,见图 13。

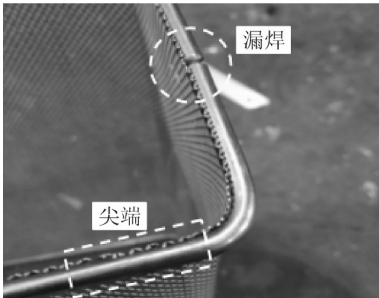


图 13 屏蔽网端部处理不良

Fig. 13 Poor handling of the end of the shielded mesh

电压升高后,缺陷暴露的会更加明显,场强集中程度更高。在屏蔽网加工过程中,一定要避免尖端的产生,确保焊接区域良好,无开焊、漏焊等问题出现,严格按照设计与工艺要求进行处理。

4 双屏蔽绝缘壳体的结构优化

根据以上分析内容可知,喷锌层端部的结构和工艺处理方式对产品局放电压水平的提升有着重要的意义,下面提出两种喷锌层端部结构的优化措施,并对两种优化措施进行仿真分析。

4.1 喷锌层端部造圆弧

在双屏蔽绝缘壳体喷锌层的两个端部各增加一圈法兰结构,将喷锌层延伸至法兰结构的外圈,喷锌层末端的结构相当于由点变成了圆弧,见图 14。

电场强度分布见图 15。优化前、后不同位置处的场强值见表 5。

喷锌层端部附加圆弧后,末端的场强值从 2.13 kV/mm 降至 1.23 kV/mm,电场强度集中程度明显得到改善,对局放电压的提升是行之有效的,但此种方法由于需要增加一圈法兰结构,绝缘壳体的

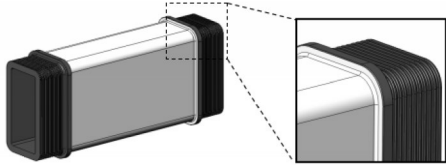
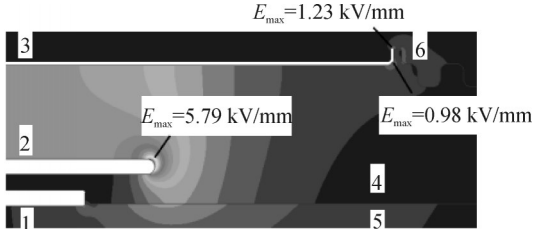


图 14 喷锌层端部造圆弧

Fig. 14 Mak arc at the end of the zinc-sprayed layer



1—内部钣金件; 2—屏蔽网; 3—喷锌层; 4—环氧树脂层; 5—空气; 6—圆弧。

图 15 端部圆弧结构的电场强度分布云图

Fig. 15 Cloud map of electric field intensity distribution with end arc structure

表 5 不同位置处的电场强度仿真值(端部圆弧结构)

Table 5 Simulation value of electric field intensity in different positions(end arc structure) kV/mm

局部位置	丝网端部	喷锌层尾部	圆弧表面	界面	钣金件端部
优化后	5.81	1.23	0.99	1.31	1.30
优化前	5.77	2.13	—	1.28	1.27
判据	8.00	2.00	2.00	2.00	2.00

尺寸会有所增加。增加一圈法兰结构虽然占用了空间,但也有一定的优势,在安装过程中,可以防止喷锌层被刮蹭,起到了保护外表面喷锌层的作用。

4.2 喷锌层端部开凹槽

在双屏蔽绝缘壳体喷锌层的两个端部开 $R=4$ mm 的凹槽,喷锌层延伸至整个凹槽的内表面,喷锌层末端的结构由点变成了半球形表面,见图 16。

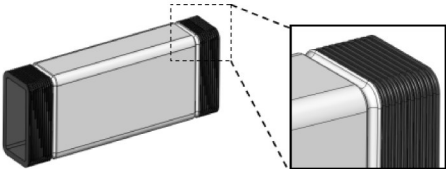


图 16 喷锌层端部开凹槽

Fig. 16 Build groove at the end of the zinc-sprayed layer

电场强度分布见图 17。优化前、后不同位置处的场强值见表 6。

喷锌层端部开凹槽后,电场强度值由 2.13 kV/mm 降低至 1.29 kV/mm,对局放电压的提升也是有效果的,开凹槽的结构不会额外增加双屏蔽绝缘壳体的

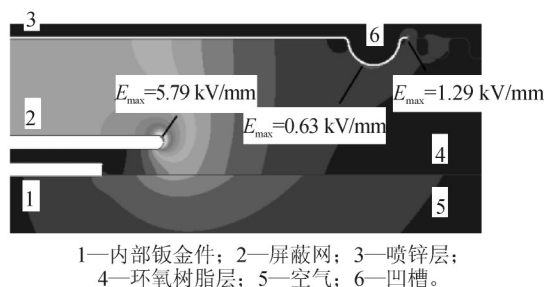


图17 端部凹槽结构的电场强度分布云图

Fig. 17 Cloud map of electric field intensity distribution
with end groove structure

表6 不同位置处的电场强度仿真值(端部凹槽结构)

Table 6 Simulation value of electric field intensity in
different positions(end groove structure) kV/mm

局部 位置	丝网 端部	喷锌层 尾部	凹槽 表面	交界 面	钣金件 端部
优化后	5.79	1.29	0.63	1.29	1.30
优化前	5.77	2.13	—	1.28	1.27
判据	8.00	2.00	2.00	2.00	2.00

尺寸,比较适用于对尺寸有特殊要求的布局。但在安装过程中会出现喷锌层被刮蹭的隐患,产品成型后喷锌层的外表面需要涂刷一层保护漆。

两种优化措施有利有弊,需要结合设计要求和安装环境进行合理选择,但对喷锌层末端的处理方式从原理上讲基本上是一致的,均是改变末端电极的形状,均匀电场,使集中的场强降低至临界值以下,避免局部放电的产生。

5 结论

文中对双屏蔽绝缘壳体进行了结构设计与电场仿真,对不同工况条件下的电气性能进行了测试与分析,得到以下结论:

1)双屏蔽绝缘壳体的设计使PET系统中分散、复杂的绝缘问题变得集中、简单化,系统中多维度的绝缘问题集中在一个单元内进行处理,降低了分析的难度和复杂程度。集中式和模块化的处理方式,缩小了绝缘距离,提高了空间利用率,使单元布局更加紧凑,系统布局更加合理,产品的可靠性和稳定性得到了极大的提升。

2)对多个样品的局放起始电压和熄灭电压试验值进行整理分析,并与相同工况下的电场仿真值进行对比,误差控制在10%以内,验证了仿真计算方法的准确性,为喷锌层端部结构的优化设计提供参考。

3)在不同工况下,利用高介电强度的SF₆气体对双屏蔽绝缘壳体的局放电压进行测试与分析,确定

了影响双屏蔽绝缘壳体电场设计的关键结构参数,即金属网端部的形状和喷锌层末端的结构形式。

4)对喷锌层末端的结构提出了两种优化改进措施,分别是喷锌层端部造圆弧和喷锌层端部开凹槽。这两种措施都可以提高双屏蔽绝缘壳体的局放电压水平,但在实际应用中,要结合设计要求和安装、使用环境合理选择。

参考文献:

- [1] 李子欣,高范强,赵 聪,等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5):1274-1289.
LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [2] 高范强,李子欣,徐 飞,等. 一种高频链模块化电力电子变压器[J]. 电工电能新技术,2017,36(5):51-58.
GAO Fanqiang, LI Zixin, XU Fei, et al. Power electronic transformer based on modular converter with high-frequency link[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(5): 51-58.
- [3] 卢子广,赵 刚,杨达亮,等. 配电网电力电子变压器技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(5):48-54.
LU Ziguang, ZHAO Gang, YANG Daliang, et al. Overview of research on power electronic transformer in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(5): 48-54.
- [4] 于程皓,王玉斌,李厚芝. 基于高压碳化硅器件的三相固态变压器拓扑及其在电网电压不平衡下的控制[J]. 电工技术学报,2017,32(2):111-118.
YU Chenghao, WANG Yubin, LI Houzhi. The three-phase solid state transformer topology based on high-voltage SiC device and control strategy under unbalanced grid voltages [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 111-118.
- [5] 季振东,李东野,孙毅超,等. 单相级联型固态变压器直流电压平衡控制研究[J]. 电气工程学报,2017,12(5):15-21.
JI Zhendong, LI Dongye, SUN Yichao, et al. Research on DC voltage balancing strategy of single-phase cascaded solid state transformer[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(5): 15-21.
- [6] XU S, HUANG A Q, BURGOS R. Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(3): 186-198.
- [7] 陈 彬,李 琳,赵志斌,等. 电感集成式大容量高频变压器精细化设计方法[J]. 中国电机工程学报,2018, 38(5):1356-1368.
CHEN Bin, LI Lin, ZHAO Zhibin, et al. Design method of inductor-integrated high-power high-frequency transformers

- [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1356-1368.
- [8] 张学垠, 徐永海, 肖湘宁. 适用于中高压配电网的高功率密度谐振型级联 H 桥固态变压器[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 310-321.
- ZHANG Xueyin, XU Yonghai, XIAO Xiangning. A high power density resonance cascaded H - bridge solid - state transformer for medium and high voltage distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 310-321.
- [9] 雷 洋, 全相军, 黄 勤. 基于模块化结构的固态变压器硬件设计[J]. 电源学报, 2019, 17(5): 4-10.
- LEI Yang, QUAN Xiangjun, HUANG Qin. Solid - state transformer hardware design based on modular architecture [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(5): 4-10.
- [10] 梁得亮, 柳轶斌, 寇 鹏, 等. 智能配电变压器发展趋势分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 1-14.
- LIANG Deliang, LIU Yibin, KOU Peng, et al. Analysis of Development trend for intelligent distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 1-14.
- [11] ZHAO Chuanhong, DUJIC D, MESTER A, et al. Power electronic traction transformer - medium voltage prototype [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (7): 3257-3268.
- [12] WANG Dan, TIAN Jie, MAO Chengxiong, et al. A 10 kV/ 400 V 500 kVA electronic power transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 6653-6663.
- [13] 王 鹏, 赵政嘉, 刘雪山, 等. 电力电子设备中的电气绝缘问题[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2309-2322.
- WANG Peng, ZHAO Zhengjia, LIU Xueshan, et al. Electrical insulation problems in power electronics devices [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2309-2322.
- [14] 刘桂华, 李水胜, 董淑春, 等. 固体绝缘环网柜中关键结构的设计与分析[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 136-140.
- LIU Guihua, LI Shuisheng, DONG Shuchun, et al. Study on the key structure design of solid insulated ring main unit[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 136-140.
- [15] 严 璋, 朱德桓. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- YAN Zhang, ZHU Dehuan. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [16] 杨敬华, 范承勇. 40.5 kV 真空断路器绝缘结构电场分析及优化设计[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 146-152.
- YANG Jinghua, FAN Chengyong. Electric field analysis and optimization design of insulation structure of 40.5 kV vacuum circuit-breaker[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 146-152.
- [17] 侯春光, 李秋红, 高有华. 12 kV 涂敷屏蔽层的固体绝缘环网柜局部放电分析与结构设计[J]. 高压电器, 2018, 54 (6): 241-247.
- HOU Chunguang, LI QiuHong, GAO Youhua. Partial discharge analysis and structure design of solid-insulated ring main units with 12 kV coated shield[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 241-247.
- [18] 汤 伟, 张建宏, 王振良, 等. 环氧树脂绝缘浇注件表面金属涂敷层末端结构设计的探讨[J]. 高压电器, 2014, 50 (12): 137-140.
- TANG Wei, ZHANG Jianhong, WANG Zhenliang, et al. Study on the terminal structure design of metal-coating for epoxy resin casting insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 137-140.
- [19] 白亚民, 王劲松, 梅志刚, 等. 旋转电机的绝缘-设计、评估、老化、试验、修理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- BAI Yamin, WANG Jinsong, MEI Zhigang et al. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [20] 刘玉春, 董雪生, 郎福成. 固体绝缘环网柜开关模块局部放电原因分析及解决方案[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 246-251.
- LIU Yuchun, DONG Xuesheng, LANG Fucheng. Analysis of PD causes and solutions of switch module of SIRMU[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 246-251.
- 周 伟 (1986—), 男, 硕士, 主要从事中、高压绝缘结构的设计与优化 (E-mail: Wei.PD.Zhou@deltaww.com)。
- 谢毅聪 (1978—), 男, 硕士, 主要从事电力电子装置的中压绝缘和电磁兼容研发 (E-mail: Yicong.Xie@deltaww.com)。
- 张伟强 (1974—), 男, 博士, 主要从事宽禁带技术、中低压大功率变换器研发 (E-mail: Weiqiang.Zhang@deltaww.com)。