DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.11.019

220 kV合成空气电压互感器研究与设计

赵新科， 孙龙勇， 姚灿江， 陈奕嘉， 田超群
（河南平高电气股份有限公司，河南 平顶山 467001）

摘要： 2023年欧洲议会通过提议2031年开始不再使用145 kV以上含氟气体开关设备，开发合成空气绝缘的环保型电压互感器，以减少温室气体排放并应对电力市场的发展需求。合成空气的绝缘性能较SF_6绝缘性能较差，0.8 MPa压缩空气绝缘强度仅为0.4 MPa SF_6绝缘强度的约50%。合成空气绝缘性能差造成电压互感器绝缘性能差、绕组尺寸大、漏电抗高等一系列问题。文中介绍了菱格薄膜在空气下的绝缘仿真及性能测试方法，绕组尺寸优化、整体结构电场仿真及优化设计，220 kV合成空气电压互感器顺利通过了雷电冲击、操作冲击、温升、精度测试(0.2级)。合成空气电压互感器的成功研制，实现了产品的环保型设计，为新时代低碳发展提供了技术支撑。

关键词： 合成空气；环保型电压互感器；温室气体；菱格薄膜；漏电抗

Research and Design of 220 kV Synthetic Air Insulated Voltage Transformer

ZHAO Xinke, SUN Longyong, YAO Canjiang, CHEN Yijia, TIAN Chaoqun
(Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: In 2023, the European Parliament passed a proposal to phase out the use of fluorinated gas switchgear above 145 kV starting from 2031, and to develop environmentally friendly voltage transformers using synthetic air insulation so as to reduce greenhouse gas emissions and meet the development needs of the electricity market. The insulating performance of synthetic air is significantly inferior to that of sulfur hexafluoride, with the dielectric strength of 0.8 MPa compressed air being only 50% of that of 0.4 MPa sulfur hexafluoride. The weak insulating performance of synthetic air leads to such series of issues as weak insulation performance of voltage transformers, large coil dimensions and high leakage reactance. In this paper the insulation simulation and performance testing methods of diamond-grid film in air, coil dimension optimization, overall structural electric field simulation, and optimized design are introduced. The 220 kV synthetic air voltage transformer successfully passed lightning impulse, switching impulse, temperature rise and accuracy (class 0.2) tests. The successful development of the synthetic air voltage transformer has achieved an environmentally friendly design for the product and provided equipment support for low-carbon development in the new era.

Key words: synthetic air; environmentally friendly voltage transformer; greenhouse gas; diamond-grid film; leakage reactance

0 引言

SF_6作为传统的绝缘气体，具有优良的绝缘和灭弧性能，被广泛应用于中高压电力设备中，但SF_6的全球变暖潜能约为CO_2的23 900倍[1]，被列入排放受限制的6种温室效应气体之一。

世界各国都在积极采取措施减少温室气体排放。2023年10月19日，欧洲议会通过《欧盟ST-14409-2023-INIT修正案》，提议2028年开始不再使用145 kV及以下含氟气体开关设备，2032年开始不

收稿日期：2026-03-21； **修回日期：**2026-06-11
基金项目：南方电网有限责任公司科技项目(0301002023030103SY00129)。
Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(0301002023030103SY00129).

再使用145 kV以上含氟气体开关设备[2]。美国加利福尼亚州空气资源委员会CARB制订了2025年启动SF_6电器的退出计划[3]。环保型罐式电压互感器的需求与日俱增，开展关键技术、核心产品迭代升级，满足用户对低碳环保电压互感器的需求，进一步推动新型电力系统建设，更好地服务国家新型能源体系建设和“双碳”目标实现[4-5]。

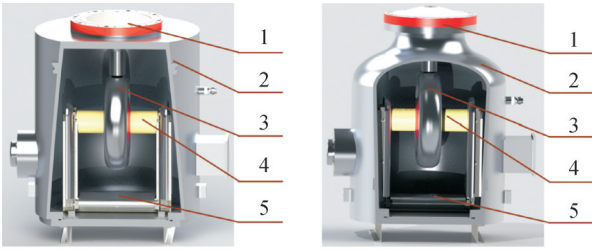
电磁式电压互感器(PT)为封闭开关设备GIS用罐式电压互感器，以电磁感应原理为技术基础，将一、二次绕组、铁心、高压屏蔽、侧屏蔽、导电杆等安装在一个充满绝缘气体的封闭金属壳体内。绝缘气体可以是绝缘性能优良SF_6气体，也可以是空气、二氧化碳[5]等其他气体。本案中采用0.8 MPa的合成空气，O_2体积分数20.5%，N_2体积分数79.5%(不再含有其他气体)，绝缘性能判距15 kV/mm，相较0.4 MPa的SF_6绝缘判距24 kV/mm[6]绝缘性能大幅降低，且由于互感器铁心—一次绕组—壳体结构为地—高压—地绝缘结构，初步设计产品相较原SF_6产品体积增大约4倍，对GIS空间布局、经济性极为不利，产品优化设计主要面临的技术问题较为突出。

对220 kV合成空气环保GIS设备，220 kV合成空气互感器结构尺寸直接决定了相间距，进而影响产品整体间隔布局、电站经济性，且产品内部压力高、壳体尺寸大，产品的结构优化设计较为困难。通过测试菱格薄膜和空气形成的膜隙结构绝缘性能的基础数据，对产品的绝缘性能及结构设计意义重大。一次绕组结构尺寸增大引起的漏电抗增加(约增加50%)，也给产品精度(0.2级、150 VA大容量)设计带来了一定困扰。

1　220 kV合成空气电压互感器结构研究

1.1　结构设计

鉴于产品内绝缘降低造成的影响及一次线包绝缘验证的需求，设计了圆柱型和带过渡筒型两种结构设计。圆柱型结构采用加大筒体、加长铁心设计，用于一次绕组的绝缘性能验证，见图1(a)。盆式绝缘子中心导体高压端通过导电杆连接高压屏蔽罩及一次绕组的高压端，一次绕组、二次绕阻、铁心通过磁耦合实现电压变换[7]。二次侧电压稳定且与一次系统电压成比例，并连接控保和测量系统。圆柱形筒体结构的设计绝缘裕度较大，采用加长的绝缘筒及铁心装配，减少侧屏蔽对一次绕组结构的影响，根据薄膜特性及测试数据调整一次绕组结构及产品整体的结构尺寸。带过渡筒型结构为圆柱型结构验证完成并优化后的结构，见图1(b)，尺寸较小、重量轻，符合工程实际需求。



(a) 圆柱型结构　　(b) 带过渡型筒体结构

1—盆式绝缘子；2—壳体；3—一次绕组高压屏蔽；4—绝缘筒及二次绕组；5—铁心装配。

图1　220 kV合成空气电压互感器三维模型

Fig. 1　3D model of 220 kV synthetic air insulated voltage transformer

1.2　电场仿真

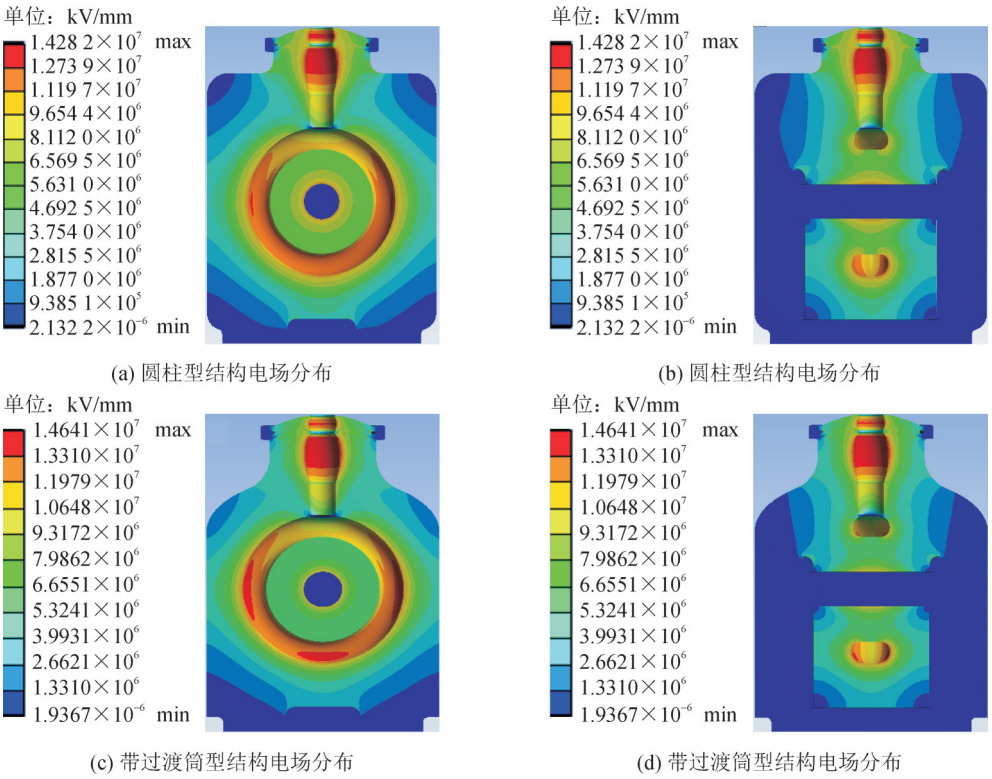
设计圆柱型和带过渡筒型两种结构，并建立相应的三维模型。边界条件为：在高压导电杆、高压屏蔽罩施加雷电冲击峰值1 050 kV的电压，铁心、A屏、壳体接地[8]，计算结果云图见图2，其结果分析见表1。

通过建立三维电场模型，对其绝缘强度进行了仿真计算。从计算结果可以看出，高压屏蔽罩电场值最大，但其绝缘强度可以满足闭锁压强为0.7 MPa(20 ℃表压)合成空气的要求。电场强度判距约为15.3 kV/mm为基础进行优化，圆柱型结构电场仿真分析仿真结果最大电场强度为14.28 kV/mm；带过渡法兰型结构电场仿真分析仿真结果最大电场强度为14.46 kV/m。

1.3　壳体强度仿真

对220 kV合成空气电压互感器壳体进行优化设计，应用Solid Works进行三维建模。设置材料属性、边界条件，应用Ansys有限元仿真软件对其进行有限元强度分析，以验证强度要求，见图3。仿真计算边界条件见表2。

从图3可以看出，圆柱型220 kV合成空气电压互感器强度壳体应力最大值为189.14 MPa，小于破坏界限值，结果良好。随后，对带过渡筒型220 kV合成空气电压互感器强度壳体进行水压试验。首先进行1.3 MPa的例行试验，保持5 min，未出现裂痕或爆裂声；然后持续升压，直至破坏压力，得到带过渡筒型220 kV合成空气电压互感器强度壳体的破坏压力3.52 MPa。破坏试验压力较破坏设计压力值余量较大，验证了设计的壳体在应用合成空气后能够满足强度要求。绝缘测试及水压姿态图见图4。



(a) 圆柱型结构电场分布　(b) 圆柱型结构电场分布

(c) 带过渡筒型结构电场分布　(d) 带过渡筒型结构电场分布

图2　220 kV合成空气电压互感器各部件电场分布

Fig. 2　Electric field distribution of various components of 220 kV synthetic air insulated voltage transformer

表1　220 kV合成空气电压互感器电场分析计算表

Table 1　Analysis and calculation table of electric field for 220 kV synthetic air insulated voltage transformer　kV·mm^{-1}

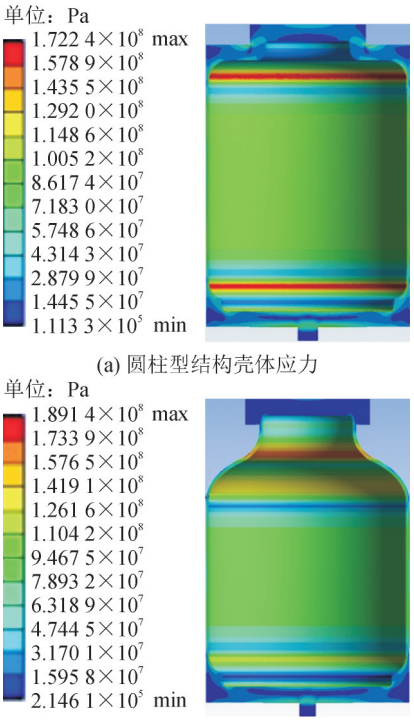
部件	圆柱型场强	带过渡筒型场强	0.7 MPa场强判据
高压屏蔽	14.28	14.46	15.30
低压屏蔽	3.95	4.92	15.30
壳体	5.81	4.83	10.00
嵌件	1.82	1.82	3.00

2　器身结构设计

2.1　器身结构

根据电磁式电压互感器的结构特点，设计了器身方案见图5。封闭金属罐体，通过器身装配的一、二次绕组实现要求的电压变比及产品设计精度[9]。侧屏蔽、底屏蔽、夹具均实现单件多功能结构设计，侧屏蔽、底屏蔽的绝缘，低点位紧固、接地功能；铁心夹件的固定、一次绕组限位、绝缘、接地功能。

器身为电压互感器实现测量功能的核心部件，器身绝缘设计的关键为合理设计一次绕组结构，增加菱格薄膜厚度[10]，保证电磁线层与层之间、高压屏蔽与地之间绝缘设计在范围之内。综合0.7 MPa合成空气—薄膜、0.33 MPa SF_6—薄膜的膜隙绝缘结构



(a) 圆柱型结构壳体应力

(b) 带过渡筒型结构壳体应力

图3　220 kV合成空气电压互感器壳体应力分布

Fig. 3　Stress distribution of the housing of a 220 kV synthetic air insulated voltage transformer

性能有较大差异，测试1、3、…、10等各层薄膜的绝缘性能基础数据，优化一次绕组的层间结构，进而进行器身的结构设计[11]。

表2　220 kV合成空气电压互感器强度仿真边界条件

Table 2　Boundary conditions for strength simulation of 220 kV synthetic air insulated voltage transformer

项目		参数
边界条件	弹性模量/GPa	71
	泊松比	0.3
	施加压力/MPa	2.3
破坏应力(判据)/MPa		265
圆柱型壳体最大应力/MPa		172.24
带过渡筒型壳体最大应力/MPa		189.14



(a) 圆柱型结构绝缘测试　　(b) 带过渡筒型结构壳体水压试验

图4　绝缘测试及水压姿态图

Fig. 4　Insulation test and water pressure posture diagram

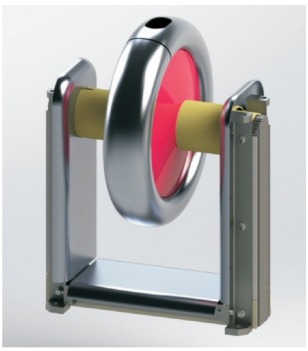


图5　器身三维模型

Fig. 5　Three-dimensional model of the body

2.2　菱格薄膜绝缘特性

电压互感器常用菱格薄膜作为一次绕组的绝缘材料，菱格状涂层的间隙在应用时呈通道状，固化时十分有利于绝缘材料间气体的排出和降温，在工作时有利于绝缘气体的浸入，使电晕破坏和局部放电破坏减少到最小。它能应用在互感器层间绕组之间，通过复合膜的绝缘和粘接，提高互感器的绝缘等级、减少了互感器的层间间隙、增强互感器的机械强度。在高压合成空气内环境下进行电压互感器菱格薄膜绝缘性能验证时，产品拆装与充放气过程繁琐，本案中设计了一次安装可以多点单独耐压的测试装置见图6。

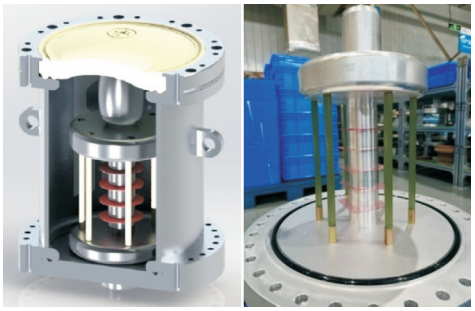


图6　菱格薄膜耐压测试装置

Fig. 6　Voltage withstand test device for diamond-grid film

压缩空气的绝缘性能会随压力升高而提升，进而间接提高菱格薄膜的整体击穿强度，原因是空气分子密度增加，电子碰撞电离的概率降低。

压缩空气环境下，多层菱格薄膜的击穿强度并非单层数值的简单叠加[12]，而是受层间界面、电场畸变、空气压力、菱格匹配度等多重因素共同影响。受多层菱格不均匀气隙，层与层之间无法完全贴合等影响，通常多层菱格薄膜的击穿强度呈现非线性叠加的现象，多层菱格薄膜的击穿强度低于各单层击穿强度的算术和[13-14]。层数增加到一定程度后，击穿强度的提升幅度会逐渐趋缓，最终趋近于某一饱和值，见图7。

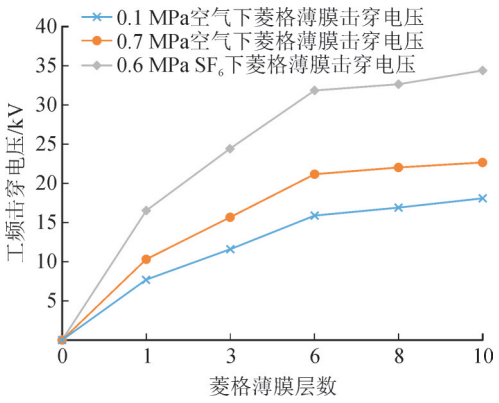


图7　菱格薄膜绝缘特性

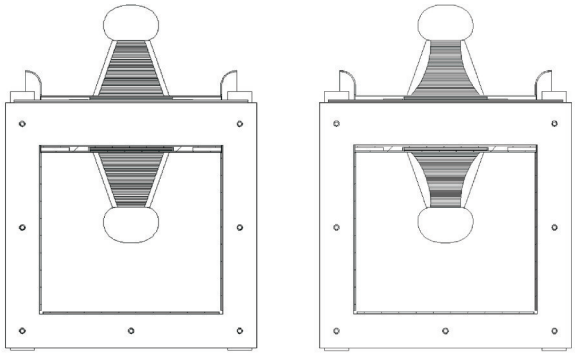
Fig. 7　Insulation characteristics of diamond-grid film

依托测试结果及公司常规SF_6电压互感器器身结构设计，对薄膜层数及电磁线层数进行优化设计，0.4 MPa SF_6薄膜层数分别为5、6、7、8，电磁线总层数为188层，对照0.7 MPa合成空气薄膜层数分别为5、6、7、8、9，电磁线对应层数为248层。结合膜隙结构电场分配及电场分析，优化后的耐受场强计算值。

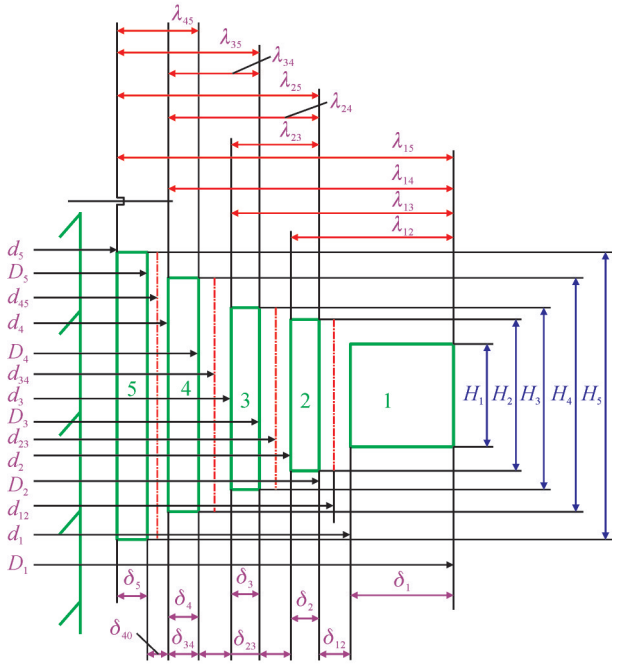
2.3　一次绕组结构设计

当互感器流过电流时，一、二次绕组产生的磁通，通过一二次绕组所占据的空间，由高压屏蔽罩逐步向内，步长内的漏磁通与每层的匝数成正比，

鉴于0.7 MPa合成空气—薄膜膜隙绝缘结构相比0.33 MPa SF_6—薄膜的膜隙绝缘结构绝缘性能降低约35%，一次绕组高度大幅增加带来的漏抗增加，设计了圆弧截面型绕组结构，见图8，相比梯形截面或宝塔型结构[15]，有效高度降低，漏抗降低，有利于产品误差性能设计[16]。



(a) 圆弧形截面结构　(b) 梯形截面结构



(c) 五绕组纵断面分布图

图8　器身结构形式

Fig. 8　Structure of the body

两种器身结构设计的一、二次绕组之间的漏抗差异，主要为一次绕组有效高度δ_1的影响，其余尺寸保持不变[17]，例如绕组1和绕组2之间的漏电抗计算见式(1)[18]，推算两种结构的等效漏电抗分别为：圆弧截面型结构X_{12}'=0.092 386，X_{13}'=0.091 038，X_{14}'=0.089 59；梯形截面结构X_{12}'=0.101 261，X_{13}'=0.100 05，X_{14}'=0.098 748。误差计算[19-20]见表3，通过降低漏抗，精度有一定提升，比差范围±0.194%降低至±0.178%，角差范围8.4分降低至7.6分。

$$X_{12}'=0.248f(N_{2n})^2KR_{12}[\delta_1(d_1+\delta_1/2)/3+\delta_{12}d_{12}+\delta_2(D_2-\delta_2/2)/3](1+\tau_{12}/100)/(H_2\times106) \quad (1)$$

式(1)中：$X_{1,2}$为绕组1与绕组2的等效漏抗；f为频率；N_{2n}为二次匝数；K为横向漏抗系数；$R_{1,2}$为一、二次绕组的等效阻抗；δ_1、$\delta_{1,2}$、$d_{1,2}$、δ_2、D_2、H_2为断面结构尺寸；$\tau_{1,2}$为纵向漏抗系数。

表3　两种器身结构的误差特性

Table 3　Error characteristics of two types of body structures

结构形式	比值误差/%			相位误差/(′)		
	绕组数	100%S_n	25%S_n	绕组数	100%S_n	25%S_n
圆弧截面型结构	ε_{u2}	−0.356	−0.089	δ_{u2}	−7.609	−1.902
	ε_{u3}	−0.356	−0.089	δ_{u3}	−7.536	−1.884
	ε_{u4}	−0.353	−0.088	δ_{u4}	−7.395	−1.849
梯形截面结构	ε_{u2}	−0.387	−0.097	δ_{u2}	−8.479	−2.120
	ε_{u3}	−0.387	−0.097	δ_{u3}	−8.414	−2.103
	ε_{u4}	−0.385	−0.096	δ_{u4}	−8.281	−2.070

3　型式试验验证

根据文中的计算分析，研制的220 kV合成空气电压互感器在中国电科院有限公司武汉分院顺利通过了国家标准要求的全部试验。

3.1　绝缘试验

研制的220 kV合成空气电压互感器通过了标准要求的全部绝缘试验，包括：1 min工频耐受电压460 kV；额定雷电冲击耐受电压(全波1.2/50 μs峰值)极对地为1 050 kV。试验姿态图见图9。

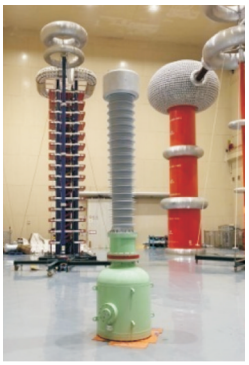


图9　220 kV合成空气电压互感器试验姿态图

Fig. 9　Test posture diagram of 220 kV synthetic air insulated voltage transformer

3.2　局放试验

对研制的220 kV合成空气电压互感器进行了局放试验，按照GB/T 20840.3—2013方式一，进行局放试验：1 min工频耐受电压460 kV后降低至高点252 kV测距局放为2.66 pC，降至低点175 kV测局放为背景值2.51 pC(与背景值2.5 pC接近)，远小于国标要求的10 pC和5 pC。在耐压值460 kV下局放值为

2.94 pC，产品绝缘可靠性良好。试验姿态图见图10。



图10　220 kV合成空气电压互感器在GTU上的局放试验姿态图

Fig. 10　Partial discharge test posture diagram of 220 kV synthetic air insulated voltage transformer on GTU

3.3　精度试验

对研制的220 kV合成空气电压互感器进行了精度试验，按照在额定功率和50/50/50/50 VA额定负荷下，二次绕组精度分别为±0.15%、±0.16%、±0.18%、±1.1%，二次绕组满足0.2/0.5/3P/3P级精度要求。

4　结论

1)通过研制的两种220 kV合成空气电压互感器，实现了产品的零碳环保设计，助力产品低碳发展进程。

2)文中提出的圆柱型及带过渡筒型两种方案，有效解决了在使用新型绝缘介质时产品一次绕组主绝缘结构验证和工程产品的优化设计相辅相成，经过验证两种结构分别满足了主绝缘结构的验证要求及工程应用需求。

3)针对器身设计主绝缘结构一次绕组，提出了薄膜性能验证方案，为一次绕组设计提供了技术支撑，按照优化后的方案产品在耐压460 kV下无局放，相较于SF_6产品性能也有一定提升。一次绕组结构形式结合了宝塔形与梯形的结构优势，降低漏抗，精度性能提升约8%。

4)圆柱型结构通过了场内全套出厂及绝缘摸底试验，并作为测试装置在公司其他产品测试中应用。带过渡筒体型结构全套型式试验的顺利通过，并通过220 kV整体GIS设备的带电考核。

参考文献：

[1] 肖　淞，石生尧，林婧桐，等.“碳达峰、碳中和”目标下高压电气设备中强温室绝缘气体SF_6控制策略分析[J]. 中国电机工程学报，2023，43(1)：339-357.
Xiao Song，Shi Shengyao，Lin Jingtong，et al.Analysis on the control strategy of the strong greenhouse insulating gas SF_6 in highvoltage electrical equipment under the goal of “emission peak and carbon neutrality”[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(1)：339-357.

[2] Council of the European Union.ST 14409/2023 INIT：proposal for a regulation of the european parliament and of the council on fluorinated greenhouse gases，amending directive(EU) 2019/1937 and repealing Regulation(EU) No 517/2014[EB/OL].[2026-03-21]. https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST - 14409 - 2023 - INIT/en/pdf.

[3] California Air Resources Board(CARB). Regulation for reducing sulfur hexafluoride emissions from gas insulated switchgear：17 CCR 95350-95359[EB/OL].[2026-03-21]. https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2010/sf6elec/completesf6.pdf.

[4] 赵　启. 环保高压开关技术和设备研究现状及展望[J]. 高压电器，2022，58(10)：16-24.
Zhao Qi.Research status and prospect of environmental protection high voltage switchgear technology and equipment[J]. High Voltage Apparatus，2022，58(10)：16-24.

[5] 张　佳，林　莘，赵晓民，等.126 kV二氧化碳GIS快速接地开关感应电流开断特性研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(5)：2020-2028.
Zhang Jia，Lin Xin，Zhao Xiaomin，et al.Research on interrupting characteristics of induced-current for 126 kV CO_2-GIS high-speed earthing switch[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(5)：2020-2028.

[6] 佚名.SF_6高压电器设计(第5版)简介[J]. 高压电器，2019，55(9)：260.
Anon.Introduction to SF_6 high-voltage apparatus design(5th edition)[J]. High Voltage Apparatus，2019，55(9)：260

[7] 肖耀荣，高祖绵. 互感器原理与设计基础[M]. 北京：机械工业出版社，2003.
Xiao Yaorong，Gao Zumian.Principles and design basis of instrument transformers[M]. Beijing：China Machine Press，2003

[8] 柳永玉. 1 000 kV SF_6标准电压互感器的绝缘设计和电场计算分析 [J]. 高压电器，2008，44(1)：47.
Liu Yongyu. Calculation and analysis for electric field intensity of 1 000 kV SF_6 gas insulated voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus，2008，44(1)：47.

[9] 赵靖英，陆俭国，王景芹. 电磁式电压互感器优化设计计算软件的开发[J]. 变压器，2002，39(4)：10-12.
Zhao Jingying，Lu Jianguo，Wang Jingqin. Development of software for optimization design and calculation of electromagnetic voltage transformer[J]. Transformer，2002，39(4)：10-12.

[10] 李建明，张冠军，王黎明. 菱格涂胶绝缘薄膜的结构优化与绝缘性能研究[J]. 绝缘材料，2016，49(8)：32-36.
Li Jianming，Zhang Guanjun，Wang Liming.Research on the structural optimization and insulation performance of diamond patterned adhesive-coated insulation film[J]. Insulation Materials，2016，49(8)：32-36.

[11] 刘 斌,赵学风,李彦明. 菱格涂胶薄膜在电压互感器绕组绝缘中的应用[J]. 变压器,2019,56(10):45-49.
Liu Bin, Zhao Xuefeng, Li Yanming. Application of diamond patterned adhesive film in voltage transformer winding insulation [J]. Transformer,2019,56(10):45-49.

[12] Zhang Jian, Zhang Yu, Chen Qiang, et al. Investigation into layer number effect on breakdown strength of multi-layer polymer films [J]. Polymers,2022,14(8):1653.

[13] 张肖杰,王银顺,代常会,等. 液氮温度下菱格点胶薄膜绝缘特性[J]. 低温工程,2012(5):15-18.
Zhang Xiaojie, Wang Yinshun, Dai Changhui, et al. Insulation characteristics of DPF at liquid Nitrogen temperature[J]. Cryogenics,2012(5):15-18.

[14] Zeng Chuang, Zheng Xiaoquan. Effects of gaseous defects on glycerin-impregnated multi-layer film insulation under impulse of 160-nanosecond wave-front[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(1):535-540.

[15] 张肖杰,王银顺,代常会,等. 电压互感器宝塔型线包台阶优化与冲击绝缘性能[J]. 电工技术学报,2017,32(12):189-196.
Zhang Xiaojie, Wang Yinshun, Dai Changhui, et al. Optimization of step-shaped wire bundles and impact insulation performance of pagoda-type voltage transformers[J]. Journal of Electrotechnical, 2017,32(12):189-196.

[16] 刘 斌,赵学风,李彦明. 电磁式电压互感器梯形与宝塔型线圈结构对比研究[J]. 变压器,2020,57(3):32-36.
Liu Bin, Zhao Xuefeng, Li Yanming. Comparative study on trapezoidal and pagoda-type coil structures of electromagnetic voltage transformers[J]. Transformers,2020,57(3):32-36.

[17] 李志勇. 单相五绕组电压互感器误差的计算方法[J]. 变压器,2007,44(9):7-14.
Li Zhiyong. Error calculation method of single-phase five-winding voltage transformer[J]. Transformer,2007,44(9):7-14.

[18] 肖耀荣. 电压互感器的空载漏磁和空载误差[J]. 变压器,2002,39(8):1-5.
Xiao Yaorong. No-load leakage and error of voltage transformer[J]. Transformer,2002,39(8):1-5.

[19] 丁恒春. 三绕组电压互感器实际负荷下误差的推算方法[J]. 电测与仪表,2000,37(1):28.
Ding Hengchun. Calculation method of error under actual load for three-winding voltage transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2000,37(1):28.

[20] 杨世海,周 赣,周 峰,等. 多绕组电压互感器二次负荷配置原则及其工程应用[J]. 高电压技术,2015,41(1):202-208.
Yang Shihai, Zhou Gan, Zhou Feng, et al. Configuration principle of secondary load of multi-winding potential transformer and its engineering application[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41 (1):202-208.

赵新科(1985—),男,本科,高级工程师,主要从事电磁式电压互感器、电容式电压互感器、气体电流互感器研究(E-mail:15343879658@163.com)。

孙龙勇(1984—),男,硕士,正高级工程师,主要从事电磁式电压互感器、电容式电压互感器、气体电流互感器研究(通信作者)(E-mail:sunpublic@126.com)。

(上接第153页)

程学报,2014,34(29):5140-5148.
Zheng Jianchao. Current status and application prospect of fault current limiters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5140-5148.

[24] 朱 璐,王 杉,刘俊翔,等. 500 kV高耦合分裂电抗限流器过电压抑制方法研究[J]. 高压电器,2021,57(11):108-115.
Zhu Lu, Wang Shan, Liu Junxiang, et al. Research on overvoltage suppression methods for 500 kV high coupling split reactance current limiters[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(11):108-115.

韩四满(1983—),女,硕士研究生,副教授,主要从事电气设备故障诊断及状态评价工作(E-mail:271612243@qq.com)。

姚晓飞(1985—),男,博士研究生,副研究员,主要从事相控快速真空开断理论和技术、高压断路器可靠性理论和技术等研究(通信作者)(E-mail:yaoxf85@maii.xjtu.edu.cn)。