

# 变压器套管的发展历程与挑战

王永琪<sup>1,2</sup>, 吴广宁<sup>1</sup>, 刘凯<sup>1</sup>, 林牧<sup>1</sup>, 丁镇<sup>1</sup>, 汤浩<sup>3</sup>

(1.西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2.西南交通大学唐山研究院, 河北 唐山 063000;  
3.中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 变压器套管主要用于固定引线和保证引线对外绝缘, 在运行中长期受到电、热、力多重物理场的作用, 其稳定性决定了变压器的安全运行。文中简述了套管的起源, 梳理了套管在时间、结构与材料3个维度的演化历程; 分析了套管内部过热、局部放电以及地震损坏等影响安全性与稳定性的故障, 归纳了现阶段上述问题的有效解决方法和检测技术, 对比了各方法的时效性与可靠性; 最后提出了变压器套管小型化、轻量化、低成本与大容量的发展方向, 为变压器套管未来的研发提供借鉴。

**关键词:** 变压器套管; 发展历程; 安全性与稳定性; 检测技术; 发展方向

**中图分类号:** TM 406 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2022)06-0059-09

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20220609

## Development History and Challenges of Transformer Bushing

WANG Yongqi<sup>1,2</sup>, WU Guangning<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>1</sup>, LIN Mu<sup>1</sup>, DING Zhen<sup>1</sup>, TANG Hao<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;  
2. Tangshan Graduate School, Southwest Jiaotong University, Tangshan 063000, Hebei, China;  
3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China)

**Abstract:** Transformer bushing is mainly used to fix the leads and ensure the external insulation of the leads. It is subjected to multiple physical fields of electricity, heat and force for a long time in operation, and its stability determines the safe operation of transformer. Firstly, the origin of bushing is briefly described, the evolution of bushing in time, structure and material are summarized. Then, the defects and faults affecting the safety and stability of bushing, such as overheating, partial discharge and earthquake damage, are analyzed. Moreover, the existing effective solutions and detection techniques for the above problems are summarized, and the timeliness and reliability of each method are compared. Finally, the development goals of transformer bushing with miniaturization and lightweight, low cost and large capacity are put forward, which can provide references for the development of domestic transformer bushing.

**Key words:** transformer bushing; development history; safety and stability; detection technology; direction of development

## 0 引言

作为变压器核心组件之一, 套管承担着引线对地绝缘的作用, 还起到了固定支撑引线并将引线与外部隔绝的作用<sup>[1-2]</sup>。

套管在投入运行后, 其服役周期长、工作环境复杂, 同时受到多震、高温、强电等复杂因素的影响, 因此其绝缘性能势必下降。变压器套管的主要故障包括接头过热、局部放电、地震损坏等<sup>[3-4]</sup>。近年来,

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(SGTYHT/19-JS-215)

上述套管故障时有发生。据国家电网统计, 变压器事故中 20% 以上由套管损坏引起<sup>[5]</sup>。因此套管的稳定性能对于变压器的安全是一重要关键保障, 更维系着电力系统输配电的可靠性。

针对变压器套管的各种故障, 工程上有不同的检测技术, 例如: 红外成像技术可甄别过热与渗漏油故障; 特高频法可检测套管局部放电故障; 油色谱法可通过监测套管内气体种类与比例诊断相关故障; 介电响应技术可检测绝缘系统受潮老化程度。另外, 为保证套管投入使用时的安全性, 其绝缘设计应当满足型式试验与例行试验检测标准<sup>[6]</sup>。

下面梳理了变压器套管从雏形到成熟的演化历程,综述了接头过热、局部放电、地震损坏等影响安全性能的故障特征及解决措施,并分析了红外成像、介电响应、特高频与油色谱等检测技术的特点与不足,最后展望了国内超高压、特高压领域变压器套管的未来发展方向。

## 1 变压器套管起源

变压器套管作为变压器引线固定装置,其与变压器诞生的时间差较小。1850年德国技师路姆考夫(H D Ruhmkorff)在前人的基础上制作出改良版的感应火花线圈,即路姆考夫感应线圈<sup>[7]</sup>。路姆考夫感应线圈的原边与副边引线处套加有玻璃管,内

部充入空气以增加电气性能;1891年,在特斯拉发明的高频变压器中,也将导线引入玻璃管中<sup>[8]</sup>。两者将玻璃管作为套管装置,保护引线并保证其对外绝缘,这是变压器套管的雏形与起源。

## 2 变压器套管发展历程

### 2.1 时间节点

#### 2.1.1 套管技术发展过程

套管发展各阶段时间节点如图1所示。

变压器套管的发展阶段基本对应套管的演化周期。从1831年出现法拉第感应线圈开始到1900年,变压器套管探索尚处在初级阶段,其作用只为接

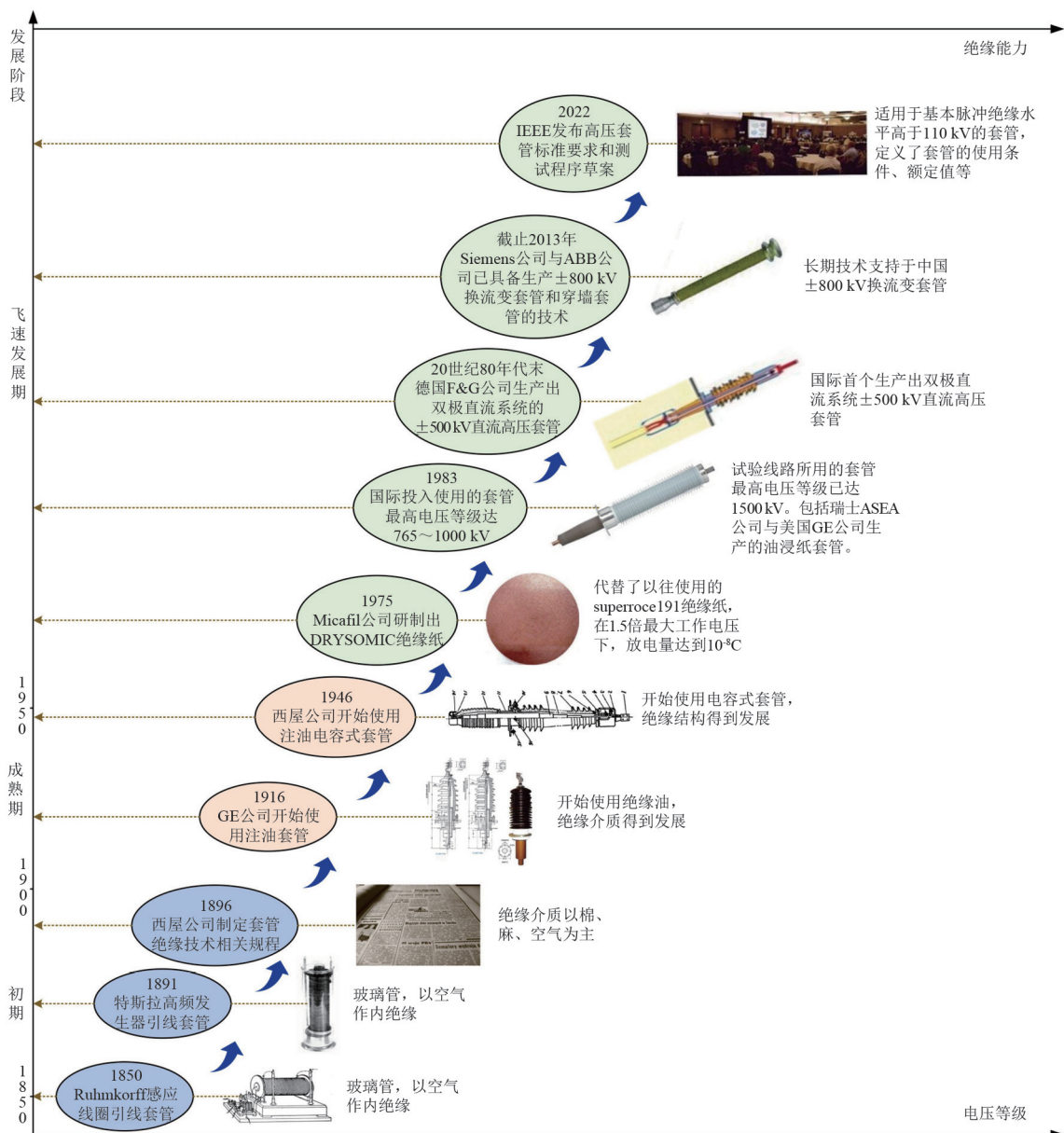


图1 套管发展阶段

入并保护引线,鲜有考虑绝缘性能的措施,因此无论是套管还是线圈层之间的绝缘措施都十分粗糙简陋。1895年以前工程上对于绝缘材料、绝缘方法知之甚少,直至1896年美国西屋公司才制定出相关规程。

而在1901年至1950年期间,变压器套管技术进入成熟阶段。套管绝缘结构与材料也逐渐推陈出新,由最开始的空气为绝缘介质发展到以棉、麻、绝缘油等作为内绝缘。为解决套管电压等级受限的难题,开始出现电容式套管<sup>[8]</sup>,典型产品为GE公司使用的充油套管和西屋公司使用的充油电容式套管。

20世纪50年代以后,变压器套管进入飞速发展阶段。为适应电压等级逐步升高的现状,套管绝缘形式开始多样化,并且体积质量增大。在绝缘结构方面,由胶粘纸电容式发展到胶浸纸电容式、油浸纸电容式;在绝缘材料方面,由纯瓷套管发展到树脂套管、复合材料套管等<sup>[9]</sup>。随着直流输电工程的问世,换流变压器直流套管也得到快速发展,为适应换流变压器的复杂强电场,国际上各厂家相继研发出配套的套管结构,典型产品包括ABB公司研制出的GOA-GOE系列套管与 $\pm 800$  kV换流变压器套管。

### 2.1.2 中国套管关键技术突破历程

中国套管研究起步晚,但受国际大环境影响,发展迅速。南京电气集团自20世纪50年代起开始研制电容套管,先后在关键技术取得突破,填补了国内相关领域的空白<sup>[10]</sup>。新世纪以来,中国电力产业发展迅速,部分电压等级套管已达到行业先进水平。国电四维公司率先打破国外垄断,研制出220 kV电容式环氧玻璃干套管<sup>[11]</sup>。同时中国已经能够生产直流 $\pm 400$  kV穿墙玻璃钢套管和220 kV交流变压器玻璃钢套管,在20多个省份的电网中投运近万台,并有部分产品出口到北美国家。

但是中国套管研究仍处于瓶颈阶段,例如中国西电联合西安交通大学团队研发的 $\pm 800$  kV特高压干式直流套管,在投入使用时出现诸多不足之处,如过热缺陷、绝缘劣化等问题并没有彻底解决,因此特高压换流变压器阀侧套管还需依赖进口。国际上高压套管技术处于领先地位的企业包括但不限于ABB公司、HSP公司、NGK公司。究其原因,还要归结于中国套管关键技术领域未得到突破,例如套管内绝缘材料之间的性能匹配机制、绝缘组件与载流导管的组合结构设计、温度分布变化特性规律等<sup>[12-15]</sup>。基于此,中国特高压直流套管的研究任重道远,需要纵深发展和细致化探索。

中国套管关键技术突破概况如图2所示。

### 2.2 结构演化

早期变压器套管结构简单,电压应用等级较低。随着工程电压等级逐渐提高,套管结构不断翻新,由非电容式的单体瓷绝缘套管发展至油浸纸电容式套管。各阶段套管典型结构如图3所示<sup>[2]</sup>。

国际上早期整体式套管由美国GE公司与西屋公司牵头制造;电容式套管的原理可以追溯到20世纪早期,西门子公司公司的R Nagel、西屋公司的A B Reynders以及麦克菲尔(Micafil)公司与瑞典通用电机公司(ASEA)公司相继发表论文,描述了电容式套管一般原理,并与整体式套管进行比较<sup>[16]</sup>。以西门子公司为代表的各国厂家在高压、超高压、特高压领域逐渐试制出相应规格的套管,加快了电力工业的发展进程。

#### 2.2.1 整体式套管

整体式套管主要用于25 kV及以下的场合,适用范围包括小配电变压器到大发电机升压变压器。

1) 复合瓷绝缘式套管又称复合式套管,由上、

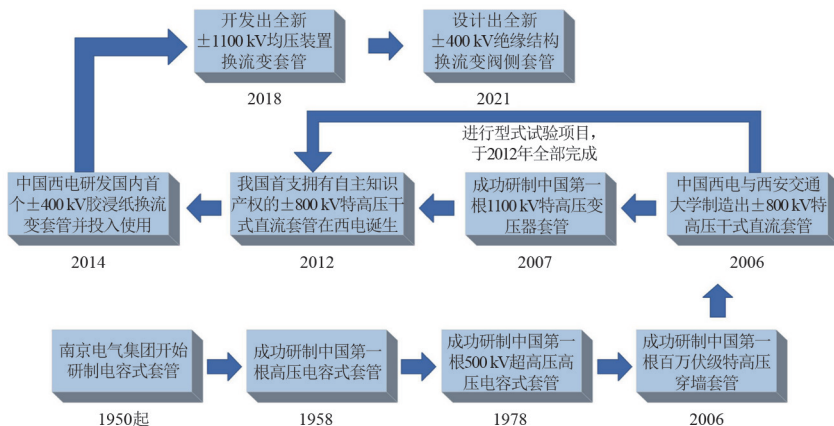


图2 中国套管关键技术突破概况

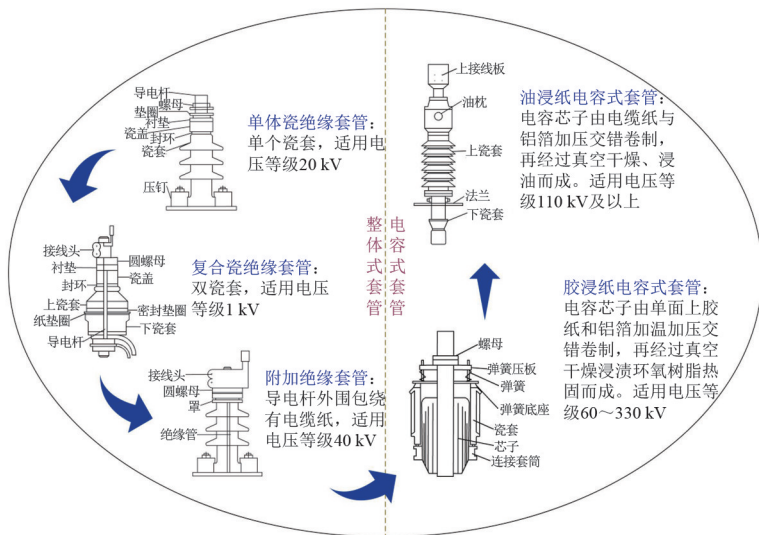


图 3 典型套管结构

下双瓷套组成,中间通有导电杆。复合式套管又分为内复合式与外复合式。外复合式套管易内部积存水分而发生闪络,因此通常使用内复合式套管。

2) 单体瓷绝缘式套管的单个瓷套通过法兰或者压钉固定安装在变压器箱盖上。当单体瓷绝缘套管中电流超过 600 A 时,顶部设有气孔且套管内腔充满变压器油以改善散热环境。

3) 附加绝缘套管中的导杆式套管的导电杆外围套有绝缘管,穿缆式套管的电缆表面包绕有 3~4 mm 厚度的电缆纸。这些附加结构不仅改善了套管内电场分布,还提升了击穿电压水平。事实上,当纯瓷套管电压等级达到 35 kV 或电压在 20 kV 以下同时电流大于 600 A 时,需要更优的散热与绝缘性能,于是便产生了附加绝缘结构。

### 2.2.2 电容式套管

常见的电容式套管包括胶粘纸电容式套管、胶浸纸电容式套管和油浸纸电容式套管。电容式套管几乎用于 25 kV 以上的所有电压等级。

1) 胶粘纸电容式套管的主绝缘为胶纸本身,电容芯子由涂抹树脂的绝缘纸卷绕而成,在卷绕过程中每一纸层因树脂的热固化而粘结。胶粘纸电容式套管是较早使用的电容套管,但其制造工艺简陋,未经过真空处理,在使用过程中极易发生电容阶跃,因此已渐渐被淘汰。

2) 胶浸纸电容式套管的主绝缘电容芯子由 0.05~0.07 mm 厚的单面上胶纸与 0.007 mm 或 0.01 mm 厚的铝箔加温加压交错卷制,再经过真空干燥浸渍环氧树脂热固而成。其基于良好的气密

性,无需护套,可直接与变压器油或 SF<sub>6</sub> 气体接触。

3) 油浸纸电容式套管是目前电气工程上主要使用的套管形式,其主绝缘电容芯子由 0.08~0.12 mm 厚的电缆纸与 0.007 mm 或 0.01 mm 厚的铝箔加压交错卷制,再经过真空干燥、浸油而成,芯子与绝缘套管内壁之间充入与浸润时相同的绝缘油。油浸纸电容式套管对气密性要求严格,因此套管下部与变压器油接触部分需要加上瓷套。

## 2.3 材料创新

套管常用外绝缘材料包括电瓷、环氧树脂与复合绝缘材料。

### 2.3.1 电瓷

早期电瓷以长石质瓷为主,坯料由黏土、长石和石英 3 种原料组成;后为提高瓷体强度常增加石英原料比例形成高硅瓷。

其后日本首次使用方石英质电瓷材料,机械强度高于普通电瓷,但后期强度下降较快,难以满足更高电压等级需求。

1931 年,西门子公司将烧结氧化铝陶瓷用于制造火花塞绝缘子,引发了人们对高铝陶瓷的研究。铝质瓷不仅使产品的可靠性有了极大的提高,而且使瓷绝缘子长期存在的质量问题大为减少。

### 2.3.2 环氧树脂

环氧树脂是指分子中含有 2 个以上环氧基团的一类热固性聚合物的总称,电气工程中常用的一类为双酚 A 型环氧树脂。

环氧树脂于 20 世纪 30 年代研制成功,40 年代末开始商业化使用,并首次用于电子设备的成型和

封装。环氧树脂化学结构稳定,具有耐紫外线照射、耐高温、抗老化、不易产生气隙、绝缘强度高等优势,使环氧树脂套管有其独特的应用价值<sup>[17-18]</sup>。

### 2.3.3 复合绝缘材料

20世纪50年代左右,欧美等国家开始研究复合绝缘材料,采用聚四氟乙烯、乙丙橡胶和环氧树脂等作为主要的绝缘材料,但因工艺原因,绝缘强度不高;70年代后期采用硅橡胶材料后,复合绝缘材料才得到广泛应用。

复合绝缘材料套管具有机械强度高、耐污性与憎水性好、体积小以及重量轻等优点。但其材料化学稳定性较差,在长期紫外线照射以及高温、强电、环境腐蚀下,极易发生老化,造成伞裙损坏<sup>[19-20]</sup>。

## 3 面临的挑战

### 3.1 变压器套管典型故障

套管长期服役于强力、高温、强电的多物理场环境中,多面临接头过热、局部放电与机械损坏的故障问题。

#### 3.1.1 过热故障

接头过热是造成变压器套管故障原因之一。套管接头过热主要发生在接线板与外部引线接头连接处、将军帽与接线板连接处、导电头与内部绕组引头连接处。近年来,110 kV及以上变压器套管因接头温度较高导致损坏的事故时常发生<sup>[21-24]</sup>。过热的本质在于热散失速率与热生成速率的失衡,热量长时间集中在套管内部必然导致热故障。过热原理本质在于焦耳热原理和电压型致热。基于此,引起套管接头过热的直接原因有紧固不足、实际接触面积小于标称接触面积、螺纹公差配合不当、加工尺寸存在偏差、接触螺纹长度不足、套管定位销变形及安装错位、定位螺母缺失或松脱等;另外,当接触面发生电化学腐蚀时易形成氧化膜增加接触电阻,导致套管过热烧毁。对于套管过热原因分析的具体关系如图4所示。

为优化套管热环境,需要从产热与散热两方面着手解决过热问题:

1) 优化套管内部结构,如改变气隙、芯子尺寸、绝缘管直径等。但套管本身体积受限,内部构件尺寸并不能大幅度变动,上述措施对于热场优化效果有限。

2) 架构闭式重力热管。热管换热能力可观,热管工质的选择多样,易于制备,价格低廉。但该技术需要考虑气液混合态下的气密性。

3) 研发高热导率材料。

4) 加强红外测温工作。

5) 对发热严重的套管进行停电处理,更换部件。

6) 加强设备出厂验收与安装管控。

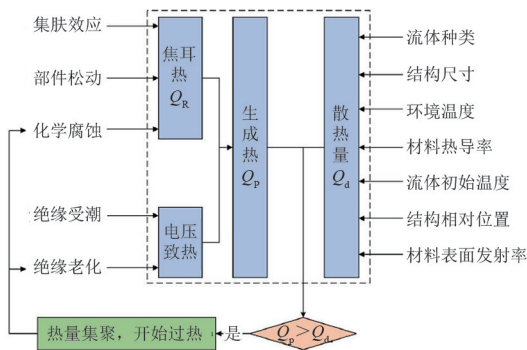


图4 套管过热原因分析

#### 3.1.2 放电故障

变压器套管中电容芯子等绝缘介质由于受潮、老化和电场不均匀易产生放电现象<sup>[25-29]</sup>。局部放电电弧释放大量能量,油纸绝缘和铝箔被烧毁,产生大量气体,易导致套管内气压增大引起爆炸。常见放电类型包括尖端放电、悬浮放电与电晕放电。悬浮放电多由于套管本身设计存在缺陷,如均压罩松动或松脱造成电场分布不均引起放电。尖端放电是在强电场作用下物体尖锐部分发生放电,一般由于金属部件加工工艺不良与绝缘老化造成。电晕放电常由其表面电压分布不均匀引起,如法兰下部裙体喷涂的金属粉脱落时,脱落部位将有强烈的电晕现象。

现有套管局部放电检测主要面临的难题有:

1) 安全性低。测量用传感器通常安装在套管表面或下端,距离高压线近,测试工作中人身与设备安全需要更多保障。

2) 抗干扰能力不足。变电站内接地装置的电磁干扰、变压器本身的机械振动和电流信号都会对检测装置造成多重干扰。

3) 局部放电故障难以精确定位和诊断。

套管局部放电技术优缺点对比如表1所示。

现阶段对于变压器套管局部放电的抑制措施主要包括:

1) 优化套管等放电裕度设计;

2) 使用如纳米 TiO<sub>2</sub> 等新型材料;

3) 进行多物理场耦合分析, 根据场中放电规律提出抑制方案;

4) 对于受潮进水造成的放电故障可采用真空热油循环干燥处理;

4) 构建智能监测、诊断系统。

表 1 典型套管局部放电检测方法优缺点

检测方法	优点	缺点
高频电流互感法	精度高	测量频带窄, 易引入外部干扰, 引起误判
超声波法	对底部载流缺陷引起的放电和下瓷套内壁沿面放电敏感	对电容芯子内部放电不敏感
特高频法	对套管底部载流缺陷引起的放电敏感	对电容芯子内部和下瓷套内壁的早期局部放电不敏感

### 3.1.3 机械故障

中国部分地区处于环太平洋地震带与欧亚地震带之间, 因地震导致变压器套管受损引起的系统瘫痪时有发生<sup>[30-34]</sup>。

变压器套管为典型长悬臂结构, 具有“高、重、柔”的特点。地震时升高座发生摆动, 地震响应被放大并向上传递, 套管根部产生较大弯矩从而发生断裂。纯瓷套管瓷套具有脆性, 阻尼小, 基本频率低, 易与地震波发生共振而碎裂; 复合套管更容易产生较大的顶部位移, 但是具有较好的延展性和能量吸收能力。

目前常见的变压器套管基础减震隔震系统包括摩擦摆隔震系统、高阻尼橡胶隔震支座、叠层橡胶隔震支座和铅芯橡胶隔震支座等。其特点归纳如表 2 所示<sup>[35-38]</sup>。

表 2 变压器套管典型隔震体系特点

隔震体系	特点
摩擦摆隔震系统	结构简单, 具有良好的承载能力、隔震性能、耗能能力、导振性能和自复位能力
高阻尼橡胶隔震支座	散能强且环境友好
叠层橡胶隔震支座	竖向承载力大, 易于控制, 自复位能力强; 但不能完全避免共振
铅芯橡胶隔震支座	结构简单, 可灵活改变阻尼

但目前隔震系统在变压器套管中的应用仍非十分完善, 有待研究的问题如下:

1) 变压器本身的机械震动与电磁噪声对于隔震系统的影响机制;

2) 隔震系统能否抑制套管底部开裂与滑移破坏现象;

3) 套管与隔震系统的物理场耦合关系。

## 3.2 变压器套管检测方法

### 3.2.1 常规试验

套管在设计、生产时为满足工程标准必须进行系列试验, 包括型式试验、例行试验。

型式试验针对设计的第一支套管, 确认设计值能够满足额定参数<sup>[16]</sup>。试验包括:

1) 最大系统电压为 242 kV 及以下套管的低频湿耐压试验;

2) 全波雷电冲击耐受电压;

3) 截波雷电冲击耐受电压;

4) 最大系统电压 345 kV 及以上套管的湿操作冲击耐受电压;

5) 穿芯导线套管帽压力试验;

6) 抗弯耐受试验;

7) 额定电流下的温度试验。

例行试验针对生产的每支套管, 目的是检查生产中应用的工艺和质量<sup>[39]</sup>。试验包括:

1) 10 kV 电容和介质损耗因数测量;

2) 带有局部放电测量的低频干耐受试验;

3) 抽头耐压试验;

4) 内部液压试验。

### 3.2.2 红外成像

红外检测技术是基于热辐射定律成立的, 红外检测是典型的非接触式测量, 不受电磁干扰。

高压套管内接线座与导电管通过螺纹进行连接; 变压器内部引线穿过导电管后其接头通过定位销固定在接线座上, 然后与导电头通过螺纹连接; 导电头与套管接线端子之间通过螺栓夹连接; 套管接线端子与外部导线接线端子通过螺栓连接。在变压器引线接头至导电接线端子很短的距离内就有多个电气接头, 发生热故障的可能性高。此时通过红外成像就可以发现异常的发热点以便及时排除故障。

套管内电压致热型故障发生时没有明显的发热点, 整体温度同步上升, 变化较为细微, 不易观察; 但是当温差超过 2~3 K 时已属严重故障, 这说明此时红外检测时效性不足。当套管内发生渗漏油时, 由于变压器油与空气的热物理性质相差甚大, 所以在分离界面的上、下区域温度梯度较大, 通过红外成像能够清晰发现。但是某些商家制作的套管上、下瓷套材料不一, 在套合处也会有明显的温度分界, 容易引起误判, 需要检测人员耐心甄别。

红外检测技术除上述不足外, 还有几个亟待解决的问题, 包括:

1) 成像图像质量差。红外辐射在空气中的衰减、光电信号处理图像固有属性差、传感器灵敏度有限等都会影响成像质量。

2) 红外图像处理软件与红外成像仪兼容性差。

3) 对于套管缺陷的定位精度较差。

4) 依赖人工诊断。一方面,人工检测效率低下;另一方面,人工检测多为经验性诊断,容易引起误判,延误检修。

因此,未来红外成像发展的方向应与智能算法、深度学习相结合,优化图像分辨率,高速处理图像信息使之与套管故障点特征相连接,实现精确定位。

### 3.2.3 特高频

特高频法常用来检测局部放电。特高频检测技术具有信息丰富、灵敏度高、抗干扰能力强的优点<sup>[39-43]</sup>。

油纸电容式套管通常放电故障发生在套管顶部、电容芯子、末屏、下瓷套与底端均压环处。因此,特高频可用于顶部悬浮放电检测、下瓷套沿面放电检测、末屏引线接触不良放电检测和底部均压环悬浮放电检测等。对于位于油箱内部的套管局部放电,特高频信号可能通过套管瓷套底部向外辐射,造成传播路径的不确定。

特高频检测技术的关键在于传感器的灵敏度和响应速度,而传感器的灵敏度、响应速度又与其安装方式、类型等有关。

除传感器安装方式与类型的制约外,特高频技术亟待解决的问题如下:

1) 抑制套管引线上的电晕干扰;

2) 特高频信号传输特性的研究;

3) 电磁波在套管内部折反射产生复杂振荡波形,需要提高信号首波灵敏度;

4) 精确读取首波到达时刻。

### 3.2.4 油色谱法

当变压器套管内发生过热、放电时,所产生的气体种类与比例有所差异,包括  $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4$ 、 $CO$ 、 $CO_2$  等,但只有出现强烈过热时才会析出  $CO_2$  气体。

油色谱分析法具有分离效能高、分析速度快、样品用量少、灵敏度高、适用范围广等优势。但也存在相应难点<sup>[44]</sup>:

1) 套管油中气体组分的获取需要提供一套完善的系统,确保抽样准确;

2) 套管内气体组分来源广泛,涉及因素较多;

3) 通过气体浓度与比值诊断多依赖于历史经验,仍有不确定性;

4) 无法进行故障定位。

因此油色谱法现多与人工智能结合,搭建全面分析、诊断、监测的平台。

### 3.2.5 介电响应

在套管结构中,受潮与过热是导致绝缘性能下降的两个重要原因。套管内部绝缘油中的水分以溶解态、悬浮态和沉积态形式存在。绝缘纸中的水分通过表面毛细管、孔洞结构吸附,或通过纤维素渗透作用吸附。在过热温度下,绝缘油会发生裂解,而绝缘纸也会发生热老化。

介电响应是一种无损检测技术,分为回复电压法、极化/去极化电流法、频域介电谱法。回复电压法最早出现,但其只能检测套管整体绝缘系统,无法区分;极化/去极化电流法可分别检测绝缘油与绝缘纸劣化程度;频域介电谱法不同于前两者,其测量频带窄,囊括的信息丰富,抗干扰能力强。但这3种方法也都受到温度因素的影响,从而特征曲线变化各异。

介电响应技术的一个关键问题在于各种方法所测得的特征曲线无法对此作出合理统一的解释,因为无论哪种检测方法,都会受到外部或者内部一系列因素的影响,因此绝缘介质老化、受潮的评估机理十分复杂<sup>[45-49]</sup>。

表3中归纳总结了介电响应技术中3种检测方法的优缺点。

表3 介电响应技术各方法对比总结

方法	测量参数	优点	缺点
回复电压法	回复电压	1) 抗干扰能力强;灵敏度高 2) 能较好评估绝缘状况	1) 无法分别评估绝缘纸与绝缘油 2) 测量结果难以合理解释 3) 测量完整光谱时间较长 4) 易受自身泄漏电流影响
极化/去极化电流法	极化电流、介电常数	1) 可分别评估绝缘纸与绝缘油 2) 灵敏度高	1) 极化、去极化初始电流不易测量 2) 易受现场干扰 3) 电流曲线各参量的解释不明确
频域介电谱法	复电容、复介电常数、介损因数	1) 获取的电气信息丰富 2) 抗干扰能力强 3) 可分别评估绝缘纸与绝缘油 4) 可通过工频试验数据验证准确性	1) 设备精密度高,成本高 2) 测量低频特征量时间漫长 3) 未形成统一理论体系描述曲线电气意义

综上,对于套管绝缘缺陷定位,检测方法中可应

用智能算法处理数据搭建计算模型,结合红外检测等其他技术辅助判断。在控制变量下,针对不同影响因素、同一影响因素的不同值可研究选取曲线上与之对应的独特参数点与变化规律,探究其电气与物理意义。

## 4 结 论

变压器套管由最初的用于接入并保护路姆考夫感应线圈引线的简易玻璃管形式,逐步推陈出新到如今各种精密复杂的形式。发展历程中具有工程进步意义的是其绝缘结构的突破、绝缘材料的创新、检测技术的提升、输电容量的扩增等,体现了工程科学进步的内在逻辑。

随着直流输电工程与新能源并网的发展,超高压、特高压领域变压器套管的自主研发意义十分重要,它关系着国家能源战略与经济民生,而下一阶段中国变压器套管(尤其是特高压领域)的发展方向为小型化、轻量化以及低成本、大容量。变压器套管的轻量化不仅有益于降低运输与安装成本,还大大减少了变压器箱体所承受的机械应力,削弱了风险累积指数。同时,经济性是工程应用的重要指标之一,低成本的内在需求也是技术的进步。而提升套管的输电容量即提升了电网系统的运转效率。

### 参考文献

- [1] 刘勇,侯向红,杨诚.新型电力变压器结构原理及常见故障处理[M].北京:中国电力出版社,2014.
- [2] 邱志贤.高压绝缘子设计与应用[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [3] 欧居勇,付东丰,陈芄.变压器套管事故的分析及预防[J].四川电力技术,2009,32(4):75-76.
- [4] 李林.一起主变压器套管将军帽发热故障的分析与处理[J].四川电力技术,2016,39(4):50-53.
- [5] 孙建锋,葛睿,郑力,等.2010年国家电网安全运行情况[J].中国电力,2011,44(5):1-4.
- [6] 路长柏.电力变压器绝缘技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997.
- [7] CAZIN M A.On a method of varying the tension of the discharge of an electric battery, and of a Ruhmkorff's coil[J].Philosophical Magazine Letters,1863,25(169):410-411.
- [8] 戴庆忠.电机史话[M].北京:清华大学出版社,2016.
- [9] 蔡国材.高压套管的进展及其有关问题[J].中国电瓷,1983(1):6-13.
- [10] 赵新生.南京电气特高压变压器套管通过鉴定[J].电器工业,2007(12):1.
- [11] 陈冰心.典型缺陷真型电容式玻璃钢套管电气特征参量测试实验研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [12] 邓江.干式 SF<sub>6</sub> 气体绝缘特高压直流套管的电热场分布特性及内绝缘结构优化设计研究[D].成都:西南交通大学,2020.
- [13] 何常新.换流变压器阀侧套管的电场分布及绝缘特性研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [14] 彭松.特高压换流变压器阀侧套管电热场分布特性研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [15] 王乾.特高压换流变压器阀侧套管电热场分布特性与优化方法研究[D].天津:天津大学,2020.
- [16] HARLOW J H.Electric Power Transformer Engineering[M].3rd ed.Boca Raton: CRC Press.
- [17] 芦竹茂.环氧树脂绝缘材料中的电树枝研究[D].保定:华北电力大学,2012.
- [18] 王旗.微/纳米氧化铝对环氧树脂导热和电气性能的影响研究[D].上海:上海交通大学,2013.
- [19] 齐玉.高压复合绝缘穿墙套管和电缆终端电场仿真及优化设计[D].北京:华北电力大学,2004.
- [20] 张程.环氧树脂/SiC 复合材料非线性电导特性研究[D].天津:天津大学,2018.
- [21] 田汇冬,靳守锋,龚傲,等.换流变阀侧干式套管表带触指失效过程分析[J].中国电机工程学报,2021,41(3):1146-1156.
- [22] 雷战斐,吴鹏,郭伊宇,等.基于三维电-磁-热流耦合方法的±800 kV 穿墙套管插接结构过热性故障分析[J].电瓷避雷器,2021(2):59-65.
- [23] 张晋寅,田汇冬,吴泽华,等.基于三维电磁-热-流耦合方法的换流变阀侧干式套管插接结构过热性故障研究[J].电瓷避雷器,2019(5):200-206.
- [24] 摆建品,孟杰,高翔.一起 220 kV 变压器低压套管局部过热分析及处理[J].变压器,2018,55(3):67-70.
- [25] 王颂,赵晓辉,方晓明,等.变压器局部放电超高频信号的外部检测[J].高电压技术,2007(8):88-91.
- [26] 葛宝金.变压器内部绝缘系统局部放电分析研究[D].



- 济南:山东大学,2018.
- [27] 朱文兵,辜超,王建,等.变压器套管典型缺陷检测技术研究[J].绝缘材料,2019,52(8):84-89.
- [28] 肖天为.变压器套管局部放电的特征与识别[J].高压电器,2015,51(7):141-147.
- [29] 孙勇,朱建新.换流变压器套管爆炸事故原因分析[J].南方电网技术,2008,2(5):82-83.
- [30] 马国梁,朱瑞元,谢强,等.变压器-套管体系基础隔震振动台试验[J].高电压技术,2017,43(4):1317-1325.
- [31] 谢强,孙新豪,赖炜煌.变压器-套管体系抗震加固理论分析及振动台试验[J].中国电机工程学报,2020,40(19):6390-6399.
- [32] 马国梁,谢强.大型变压器的基础隔震摩擦摆系统理论研究[J].中国电机工程学报,2017,37(3):946-956.
- [33] 卿东生,陈星,李晓璇,等.大型变压器抗震加固方法及其经济效用分析[J].高压电器,2021,57(11):139-147.
- [34] 曹枚根,周福霖,谭平,等.大型电力变压器及套管振动台抗震试验研究[J].振动与冲击,2011,30(11):122-129.
- [35] LAO T P, YUAN W C, FENG R W. Development and application of thought of balance between force and displacement in seismic isolation design of bridges subjected to near-fault ground motions[C]. 2018 10th international conference on measuring technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2018:10-11.
- [36] DUAN C K. Parametric analysis of friction pendulum system Inter-story isolation structure based on benchmark model[C]. 2021 7th international conference on hydraulic and civil engineering & Smart Water Conservancy and Intelligent Disaster Reduction Forum (ICHCE & SWIDR), 2021:6-8.
- [37] LIU Y F, ZHANG W X, BAO W G. Study on the seismic response of the extradosed cable-stayed bridges with continuous system for different seismic-isolated design scheme[C]. 2018 3rd International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE), 2018:248-251.
- [38] YUAN W C, WANG S J, DANG X Z. Talking about the "Double-edged sword" attribute of the force and displacement of seismic mitigation and isolation techniques[C]. 2018 3rd International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE), 2018:262-266.
- [39] 龚细秀.变压器局部放电高频和特高频联合监测法的研究[D].北京:清华大学,2005.
- [40] 何梦.变压器局部放电内置式特高频传感器优化与布置的研究[D].保定:华北电力大学,2015.
- [41] 郑书生.变压器绕组中局部放电特高频定位方法研究[D].保定:华北电力大学,2015.
- [42] 邢博.电力变压器局部放电特高频检测与诊断方法研究[D].保定:华北电力大学,2017.
- [43] 毛学飞.基于特高频技术的变压器局部放电特性研究[D].南宁:广西大学,2016.
- [44] 韦远剑.变压器故障油色谱诊断技术研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [45] KUMAR Saha T. Review of time-domain polarization measurements for assessing insulation condition in aged transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003,18(4):1293-1301.
- [46] KHANALI M, JAYARAM S H. Effect of high-frequency pulse ageing on dielectric response of paper/oil insulation[C]. 2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP), 2017:22-25.
- [47] RIEGO D M, BREAZEL R C. Evaluation of distribution class transformers using narrow band dielectric frequency response measurements[C]. 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2020:22.
- [48] ROHITH S, BARUAH N, NAYAK S K. Influence of concentration of nanoparticles on the dielectric frequency response of an insulating nanofluid[C]. 2021 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2021:12-15.
- [49] RAO B, SUDHINDRA A, RAM ACHANDRA B. Low frequency dielectric response of thermally degraded epoxy-mica insulation[C]. 2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, 2009:19-23.

#### 作者简介:

王永琪(1999),男,硕士研究生,主要研究方向为设备绝缘与在线监测;

吴广宁(1969),男,教授,博士生导师,主要研究方向为先进功能电工材料、设备绝缘在线监测、过电压及防护技术。

(收稿日期:2022-07-11)