高压套管及其绝缘

GAOYA TAOGUAN
JI
QI
JUEYUAN



主　编◇吕　刚　吕金壮
唐　超　沈其荣



重庆大学出版社

内容提要

本书是一本完整阐述高压套管及其绝缘的技术专著,详细介绍了高压套管的结构、应用、主要故障和性能测试,并对其绝缘材料的老化机理与改性方式进行了深入的探讨。本书共5章,包括高压套管与绝缘概述、高压套管的结构、高压套管主要故障及性能检测、绝缘纸老化及其改性技术和绝缘油老化及其改性技术。本书可供相关专业的科研人员、教师和学生使用,也可供从事相关行业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压套管及其绝缘 / 吕刚等主编. -- 重庆 : 重庆大学出版社, 2022.3

ISBN 978-7-5689-2986-8

Ⅰ. ①高… Ⅱ. ①吕… Ⅲ. ①高压—绝缘套管 Ⅳ. ①O521

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第195834号

高压套管及其绝缘

主　编　吕　刚　吕金壮　唐　超　沈其荣

策划编辑:荀荟羽

责任编辑:荀荟羽　　版式设计:杨粮菊

责任校对:关德强　　责任印制:张　策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:饶帮华

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路21号

邮编:401331

电话:(023) 88617190　88617185(中小学)

传真:(023) 88617186　88617166

网址:http://www.cqup.com.cn

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆俊蒲印务有限公司印刷

*

开本:720mm×1020mm　1/16　印张:20.5　字数:415千

2022年3月第1版　　2022年3月第1次印刷

印数:1—1 200

ISBN 978-7-5689-2986-8　定价:98.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

编委会

主　任：林志波　尚　涛

副主任：杨泽明　陆　岩　胡　蓉　江　一　袁　鹏　谭　劲
卢世才

成　员：徐华平　胡　江　王　谦　李　可　张　勇　孙志林
唐华东　张瑞亮　王　春　李道豫　郝越峰　刘立宝
唐文凯　庄新伟　胡　东　李　娇　张　松　李　旭
谢惊宇　郑　伟　田汶鑫　张静文　姜　鹏　杨健铭
王　伟　罗宗源　谢辰昱　宾　超　杜东元　杨　路
邱秦攀　郭　丽　刘凡栋　俎皖善　王　祥　邓文斌
蒋　泽　王　恒　赵　鹏　单华平　李　毅　陈　华

序言

在碳达峰碳中和的大背景下，特高压电网已成为中国“西电东送、北电南供、水火互济、风光互补”的能源运输“主动脉”，破解了能源电力发展的深层次矛盾，实现了能源从就地平衡到大范围配置的根本性转变，有力推动了清洁低碳转型。贯彻执行习近平总书记“绿水青山就是金山银山”的理念，能源电力行业任务重、责任艰巨，也将承担主力军的作用。在特高压工程中，套管作为电力变压器出线组件或引线穿墙的关键设备，是发展超特高压电力系统最先试制的绝缘结构。对于高压套管来讲，确保其安全运行，提高其健康水平，进而更好地保障清洁能源的可靠传输与供应，就是在为实现“碳达峰、碳中和”目标、建设美丽中国做出贡献。

本书从高压套管的发展历程与应用入手，阐述了随着电压等级的提高和电网规模的扩大，套管的市场需求越来越多，其绝缘可靠性对电力系统正常运行的重要性，以及准确评估套管的运行状态，适时采取高效的运维检修策略，对电网的可靠运行和能源安全的重要意义。本书首先详细介绍了高压套管的结构、应用、主要故障和性能测试；然后对其绝缘材料的老化机理与改性方式进行了深入的探讨，希望对读者有所裨益。

在本书的编写过程中，有关生产企业、科研院所提供了丰富的资料，中国南方电网有限责任公司、国家电网有限公司的有关同志在资料搜集和整理方面做了大量的协助工作，张松、李旭、谢惊宇、郑伟、田汶鑫、张静文等科研人员提供了详尽的相关数据，许多专家提出了宝贵的建议和意见，在此，一并表示诚挚的谢意！

由于编者团队水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

编　者

2021 年 5 月

目 录

第 1 章　高压套管与绝缘概述 …… 1
1.1　引言 …… 1
1.2　高压套管概述 …… 3
1.2.1　高压套管发展概述 …… 3
1.2.2　高压套管结构设计与绝缘材料 … 6
1.2.3　高压套管电气和化学特性 …… 9
1.2.4　高压套管的故障检测 …… 16
1.2.5　干式套管概述 …… 20
1.3　套管绝缘材料概述 …… 25
1.3.1　绝缘油发展概述 …… 25
1.3.2　绝缘纸发展概述 …… 30
第 2 章　高压套管的结构 …… 36
2.1　引言 …… 36
2.2　干式套管的结构 …… 37
2.2.1　穿墙套管 …… 37
2.2.2　出线套管 …… 50
2.3　油式套管的结构 …… 55
2.3.1　结构设计 …… 55
2.3.2　等效电路计算模型 …… 58
2.3.3　电场计算 …… 60
2.3.4　实例分析 …… 61
2.3.5　油式套管取油作业 …… 64
2.4　直流套管的结构 …… 69
2.4.1　结构类型 …… 70

2.4.2 特性分析 …… 71
第 3 章 高压套管主要故障及性能检测 …… 74
3.1 引言 …… 74
3.2 高压套管主要故障 …… 76
3.2.1 末屏故障 …… 76
3.2.2 色谱异常 …… 87
3.2.3 介损异常 …… 94
3.2.4 发热与爆炸 …… 98
3.2.5 穿缆式套管密封结构缺陷 …… 106
3.3 性能测试 …… 114
3.3.1 测试标准 …… 114
3.3.2 设备检修 …… 116
3.3.3 稳定性试验 …… 118
3.3.4 电流互感器试验 …… 120
3.3.5 高压套管末屏测试 …… 120
3.3.6 电容式套管 …… 123
3.3.7 介质损耗误差分析 …… 128
3.3.8 测试应用实例 …… 129
3.4 直流套管测试 …… 131
3.4.1 外绝缘闪络测试 …… 131
3.4.2 绝缘电阻和吸收比测试 …… 138
3.4.3 局部放电测试 …… 140
3.4.4 介质损耗和电容量测试 …… 145
3.4.5 频域介电谱测试 …… 149
3.5 高抗套管 …… 151
3.5.1 套管结构 …… 152
3.5.2 套管更换案例 …… 154
第 4 章 绝缘纸老化及其改性技术 …… 165
4.1 引言 …… 165
4.1.1 电气性能 …… 167
4.1.2 机械性能 …… 168
4.1.3 抗热老化性能 …… 168
4.1.4 化学稳定性能 …… 169
4.2 绝缘纸的老化 …… 170
4.2.1 绝缘纸老化的现象与危害 …… 170

4.2.2 绝缘纸老化的影响因素 …… 175
4.2.3 绝缘纸老化的抑制 …… 179
4.3 纳米改性绝缘纸 …… 188
4.3.1 纳米改性技术在绝缘纸中的应用 …… 188
4.3.2 纳米 SiO_2 改性纤维素绝缘纸 … 189
4.3.3 纳米 SiO_2 改性间位芳纶绝缘纸…… 225
第 5 章 绝缘油老化及其改性技术 …… 243
5.1 引言 …… 243
5.2 绝缘油老化 …… 244
5.2.1 老化影响因素及类型 …… 244
5.2.2 老化特征参量及诊断技术 …… 250
5.2.3 寿命评估方法 …… 257
5.2.4 绝缘油抗老化措施 …… 259
5.3 纳米改性矿物绝缘油 …… 260
5.3.1 研究现状 …… 260
5.3.2 纳米 SiO_2 绝缘油中水分子的扩散行为 …… 262
5.3.3 温度场的影响 …… 269
5.3.4 电场和温度协同作用的影响 … 276
5.4 表面修饰后的纳米粒子改性矿物绝缘油 …… 282
5.4.1 APTES 表面改性纳米 SiO_2 绝缘油的制备 …… 283
5.4.2 APTES 表面修饰纳米 SiO_2 改性矿物绝缘油的电气性能 …… 286
5.4.3 APTES 表面修饰纳米 SiO_2 改性矿物绝缘油的热稳定性 …… 295
参考文献 …… 309

第 1 章
高压套管与绝缘概述

1.1 引言

我国“十四五”规划中指出我国将开启全面建设社会主义现代化国家新征程，随着我国经济持续稳定增长，意味着电力需求在“十四五”建设期间持续攀升，图1.1所示为2025—2060年我国用电总量预测，全社会用电量将在2025年、2030年分别达到9.2万亿kW·h、10.7万亿kW·h。为解决我国能源国情中能源分布与负荷中心分布不均、电力消耗持续增长、输电通道建设滞后于发电建设的问题，国家提出了“西电东送”“全球能源互联网”等一系列政策。特高压输电工程成为我国“新基建”的重要建设项目，也是向全世界展示中国实力的“新名片”。在碳达峰碳中和的大背景下，特高压电网已成为中国“西电东送、北电南供、水火互济、风光互补”的能源运输“主动脉”，破解了能源电力发展的深层次矛盾，实现了能源从就地平衡到大范围配置的根本性转变，有力推动了清洁低碳转型。截至2020年底，中国已建成“14交16直”、在建“2交3直”共35个特高压工程，在运在建特高压线路总长4.8万km。我国2019年投运的昌吉—古泉±1 100 kV特高压直流输电工程是目前世界上电压等级最高、输送容量最大、输送距离最远、技术水平最先进的特高压输电工程。

高压套管作为一种重要的绝缘部件，主要搭建于变压器、电抗器、断路器等电力设备及墙体中，承担对地绝缘、支撑及载流功能，被广泛用于电站及各类高压电气设备中。若通有高压电流的导体需要穿过电位不相同的金属箱壳或墙壁，则需采用高压绝缘套管。套管主要用来支撑用电设备，同时还起到引线对地绝缘的作用。特别是在高压设备中，套管起着重要的绝缘作用。套管能否安全稳定运行，将

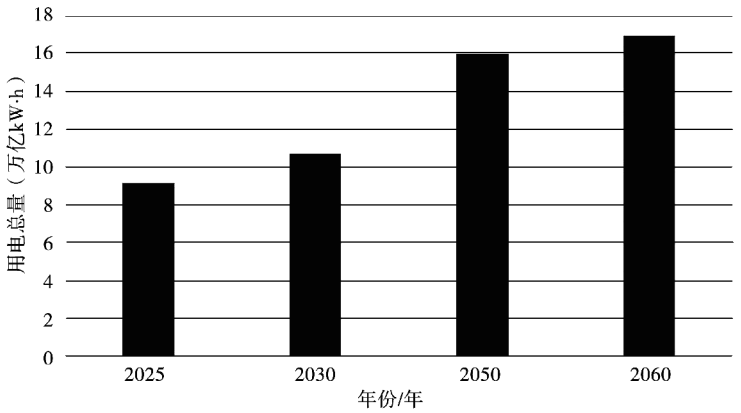


图 1.1　2025—2060 年我国用电总量预测

直接影响整个高压电气设备和用电线路是否能安全、可靠及稳定运行。在特高压工程中,套管作为电力变压器的出线组件或引线穿墙的关键设备,是发展超特高压电力系统最先试制的绝缘结构。目前在我国所建成的 ±800 kV 换流站中,其单极大都配置了 4 支穿墙套管。这 4 支套管分别为 1 支 800 kV 套管、1 支中性线套管和 2 支 400 kV 套管,图 1.2 所示为其穿墙套管的具体位置示意图。除此之外,在

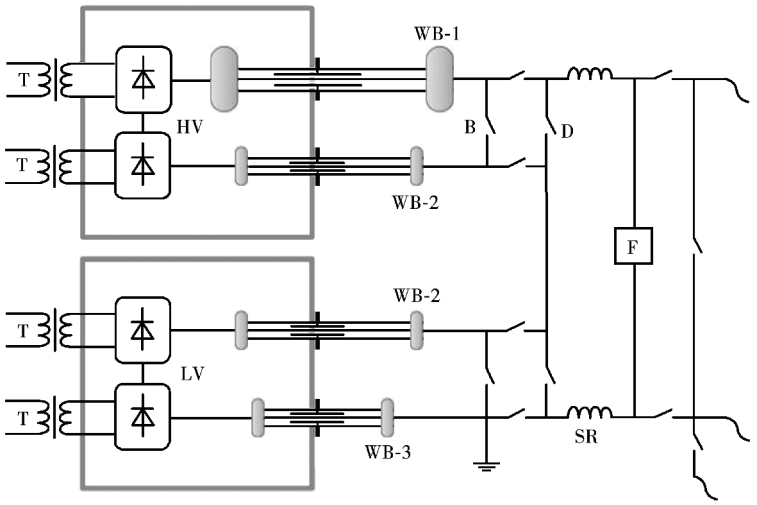


图 1.2　穿墙套管在 ±800 kV 换流站中的位置示意图

HV—高压阀厅;LV—低压阀厅;T—换流变压器;WB-1—800 kV 套管;
WB-2—400 kV 套管;WB-3—中性线套管;B—断路器;D—隔离开关;
SR—平波电抗器;F—直流滤波器

采用户内直流场设计的 1 100 kV 换流站中,单极在进、出户内直流场时还需加装 550 kV 套管和 1 100 kV 套管各 1 支,因此套管需求量进一步增加。套管在运行过

程中,会受到高压电场、磁场及温度等运行环境的作用,其绝缘会劣化,绝缘性能下降,甚至完全失去绝缘作用,导致电力变压器发生故障。随着电压等级的提高和电网规模的扩大,套管的市场需求越来越多,其绝缘可靠性对电力系统正常运行十分重要。准确评估套管的运行状态,适时采取高效的运维检修策略,对电网的可靠运行和能源安全具有重要意义。

1.2　高压套管概述

1.2.1　高压套管发展概述

高压套管是用于穿过导体的一种绝缘子,其作为一种重要的绝缘部件,主要应用在变压器、电抗器、断路器等电力设备及墙体中,承担对地绝缘、支撑以及载流功能,应用十分广泛。

绝缘套管按用途可分为电站类和电器类,前者主要是穿墙套管;后者有变压器套管、电容器套管和断路器套管等。

按主绝缘结构可分为电容式和非电容式,电容式绝缘包括胶粘纸、胶浸纸、油浸纸、浇注树脂、其他绝缘气体或液体;非电容式绝缘包括气体绝缘、液体绝缘、浇注树脂、复合绝缘。

按套管的接线方式可分为穿缆式套管和导电式套管,穿缆式套管是指变压器绕组引线用电缆穿过套管的铜管,上端和接线头连接引出,常用于额定电流在 1 250 A及以下变压器套管中;导电杆式套管是绕组引线在套管的下部均压罩内直接和下部接线头连接,电流直接由铜管传导,套管上部接线头直接和铜管连接。

根据绝缘方式不同,可以分为单一绝缘套管、复合绝缘套管和电容式绝缘套管。

(1) 单一绝缘套管

单一绝缘套管的结构简单、用途单一,其应用时间可追溯到 20 世纪 50 年代。目前,在 35 kV 以下的接引供电场合中单一绝缘套管仍被大量应用。图 1.3 为单一绝缘套管的结构示意图,圆管式的套管为单一绝缘套管的主要绝缘部件,可由氧化铝陶瓷、硅橡胶或者树脂等材料制成,其中瓷套管的应用最为广泛。可通过将绝缘套管内部制成空心结构,并在内部充以空气进行绝缘,从而改善套管法兰和端盖附近的场强。

瓷套管的外表有伞裙用来防止滑闪,除此之外,用于穿墙套管的瓷套管也常采用波纹瓷棱来替代伞裙(户外使用伞裙,户内使用瓷棱),相比于伞裙,波纹瓷棱的宽度小、制作工艺简单,能减小瓷套管质量、降低制作成本。同时波纹瓷棱的数目

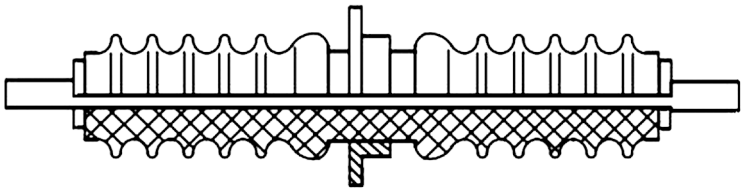


图 1.3　单一绝缘套管结构示意图

较多,可以保证泄漏路径长度,防止闪络。随着电压等级提高,为均匀空气腔的电场分布和防止导电杆表面电晕,经常会在套管内壁喷涂铝膜和导电杆外壁缠绕绝缘纸,为提高套管闪络电压和削弱法兰边缘的电场强度,20 ~ 35 kV 的瓷套管经常在法兰附近加以大伞裙,并在伞裙瓷壁上喷铝或上半导体釉。在更高等级的电压下,不适合采用单一绝缘套管。单一绝缘高温固体电制热储热装置穿墙套管的绝缘材料为外绝缘材料,因为其运行环境限制,必须采用耐高温的高温绝缘材料进行绝缘。常用的外绝缘材料包括硅橡胶、聚四氟乙烯、陶瓷及石英等。

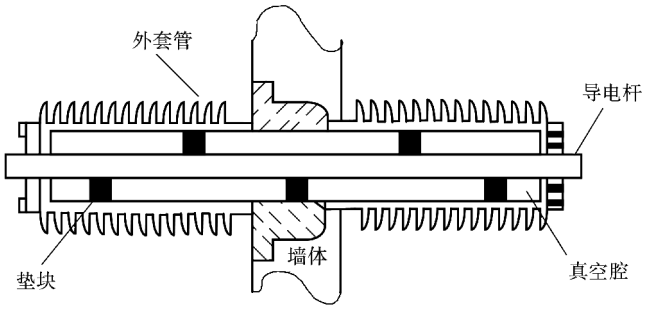
(2)复合绝缘套管

在 20 世纪 50 年代晚期之后,为了改善法兰和导电杆周围的电场并适应更高的工作标准电压,复合绝缘套管逐渐得到广泛使用,其中以充油套管最为常见。复合绝缘套管的结构类似于具有空气腔的单一绝缘层瓷套管,通过用绝缘油、绝缘气体、玻璃纤维或有机材料代替空气腔来组成复合绝缘套管。与单一绝缘套管相比,复合绝缘套管在体积、质量、耐压、散热等方面都具有明显优势。当电压在 35 kV 及以上时,为防止导电杆表面的油道内场强过高,常在导电杆上缠绕厚 5 ~ 15 mm 的绝缘纸以改善电场。然而在电压等级超过 66 kV 时,为提高击穿电压和均匀导电杆周围电场,则必须相应增加绝缘纸厚度,从而导致工艺加工困难。因此对于 66 kV 及以上电压等级的充油套管,也会使用多个同轴胶纸筒以提高击穿电压。此外,也常采用环氧树脂浸渍的玻璃纤维棒制作干式复合绝缘套管,以此提高套管的耐污能力、防爆能力和抗震性能。

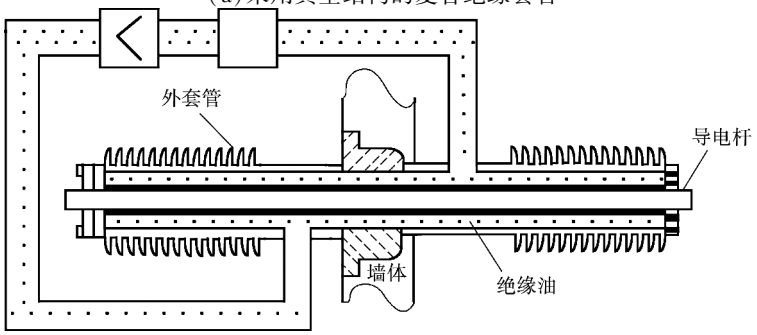
复合绝缘套管的特征在于选择合适的绝缘介质与外套管形成复合绝缘,并提高套管电晕电压。如图 1.4(a)所示为一种采用真空结构的复合绝缘套管,利用真空的电气绝缘能力和隔热能力,可以有效地实现套管绝缘水平的提升,并防止炉内热量沿套管散失,同时其套管结构简单,便于生产、安装,能减轻套管质量。真空层内布置垫块作为支撑,增强套管强度。然而,实际运行中真空复合绝缘套管的绝缘和隔热性能主要由真空层的真空度决定,真空层的泄漏或破裂都会造成极大的危害,随着运行时间增加,真空度下降时也会影响套管绝缘性能。

如图 1.4(b)所示的复合绝缘套管采用了冷却结构,利用燃点较高的绝缘油为冷却介质对套管进行冷却,避免套管因绝缘温度过高发生击穿或者缩短套管使用寿命,同时也保证了绝缘油温度处于合理的水平,不至于发生爆炸或分解。

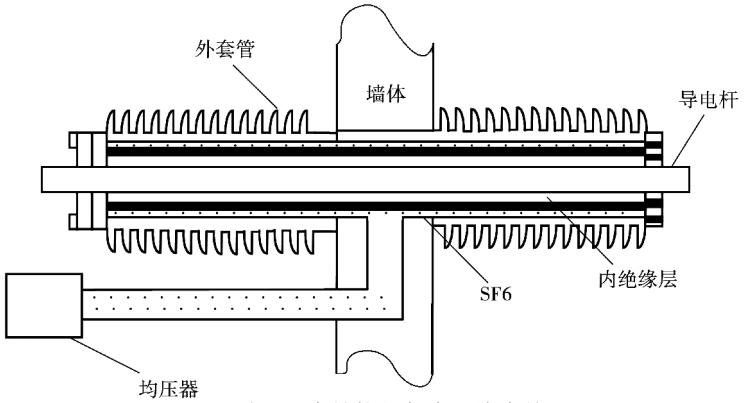
如图 1.4(c)所示复合绝缘套管采用内外层绝缘组件组合结构,内层绝缘为耐高温云母卷材组件,外层绝缘为充有 SF_6 的石英管封闭套管组件,同时石英管与外部气体均压装置相连,以保障装置安全。如图 1.4(b)和图 1.4(c)所示的复合绝缘套管均通过复合绝缘方式实现套管绝缘强度的增强,但图 1.4(b)所示的冷却式复合套管会产生较大的热量散失,不利于储热装置储热效率的提高。图 1.4(c)所示的组合式复合绝缘套管绝缘结构比较合理,但该结构下套管的直径较大,仍有改进空间。



(a)采用真空结构的复合绝缘套管



(b)采用冷却结构的复合绝缘套管



(c)采用组合结构的复合绝缘套管

图 1.4　复合绝缘高温穿墙套管

(3)电容式绝缘套管

电容式绝缘套管的出现有效解决了套管与高压设备的连接问题。电容式套管的主绝缘通过电容芯子来完成。通过在导电杆上缠绕铝箔和绝缘纸,电容器的分压原理可用于施加均匀的电场并有效地提高套管的击穿电压。根据电容芯子的浸渍工艺,电容式套管有油式套管和干式套管两种。其中,油式电容套管是电容套管中最常见的一种,绝缘油是一种性能稳定的浸渍介质,浸渍效果良好,并且油式套管的制造工艺简单。根据主绝缘材料的不同,电容式套管的电容芯子一般可分为胶纸和油纸两种。胶纸电容芯子由胶纸和电容极板卷制而成,其中,胶纸一般采用厚0.05~0.07 mm的不透油单面上胶纸,所上胶多为环氧树脂,卷制时通常使用整张胶纸包绕。电容芯子的极板多为铝箔,常用半导体材料涂刷或镶边以提高局部放电电压。油纸电容芯子由电缆纸和电容极板卷制而成,与胶纸电容芯子相同,电容芯子卷制完成后,先与瓷套及其他附件总装成整体,再抽真空充油(一般使用黏度较大的矿物油)。关于干式套管我们将在后面小节详细介绍。

根据上述高压套管的介绍,高压套管种类繁多,其结构也不尽相同,适合的应用场合也不相同。高电压等级的套管一般采用电容式,在主绝缘中嵌入铝箔作为电容极板强迫电场分布,大大提高了套管的击穿电压。随着材料科学的发展,高压套管结构设计与绝缘材料不断得到优化,进一步提升了高压套管的各项性能。

1.2.2 高压套管结构设计与绝缘材料

20世纪80年代及以前,我国电气设备的各部分分别由不同的工厂设计生产。各工厂的设计和生产只考虑单一产品,套管在设计和试验时虽满足绝缘要求,但与高压电气设备组装后进行整体耐压试验时,套管出现闪络现象的情况经常发生。原因在于套管设计时没有按照其实际运行时的条件进行绝缘分析和设计,导致套管与高压电气设备连接部位的场强超出允许极限值,进而导致闪络的产生甚至造成击穿。

因此,怎样设计使高压套管的结构更加合理或者怎样选择高压套管的构成材料是研究人员一直在探索的问题,接下来介绍20世纪以来,国内外对高压套管的结构设计及其材料选择的研究发展历程。

(1)高压套管结构设计

20世纪90年代初期,由于制作工艺水平达不到标准,我国所生产的绝缘子的质量受到严重影响。因此,这一时期国内制造的绝缘套管主要是在160 kV及以下电压等级。

21世纪以来,我国的制造技术有了长足进步,部分产品已经达到国际先进水平。如NGK唐山电瓷有限公司已制造出交流系列70~530 kV和直流系列160~400 kV的产品,并且还制造出多种绝缘子形状,有单伞形、双伞形和三伞形。

复合绝缘子的伞裙护套成形工艺主要分为 3 种类型：

①在芯管上挤压护套，然后在护套上粘接伞裙。

②首先单片压制伞裙，然后再逐片粘接到芯管上。

③将芯材置于模具内，采用高温高压注射成型工艺外包护套及伞裙。

这三种类型各具特色，可根据实际工程应用的不同而采用不同的工艺。

在过去的几十年里，不少国内外学者对复合绝缘子进行了研究，并促进了复合绝缘子的推广和应用。为了解决在使用瓷套管时安全事故多的问题，复合绝缘子已被用于许多应用中。相较于瓷绝缘子，复合绝缘子的优势取决于它的疏水性强、抗污染闪络性强和质量轻的特性。所以，复合套管将会越来越普遍地被使用。尽管复合套管尚未完全取代传统的套管，但复合套管已经成为高压绝缘套管未来的发展趋势。

目前，我国已经可以大规模生产电压等级为 35 ~ 500 kV 的棒形悬式复合绝缘子，并且已经大约有 250 万只复合绝缘子在联网运行。具备生产这个电压等级能力的公司有襄樊国网合成绝缘子股份有限公司、东莞高能实业有限公司和广州 MPC 国际电工有限公司等企业。其中，襄樊国网合成绝缘子股份有限公司等几家公司的产品已经销往国际市场。

我国现在已具备生产 550 kV、750 kV 及 1 000 kV 交流电压等级的复合绝缘子和 ±500 kV、±800 kV 直流电压等级的复合空心绝缘子的能力。但由于特高压等级的复合绝缘套管电压等级高，在运行时需要考虑的影响因素较多，所以绝缘结构较为复杂，目前还没有切实可行的参数标准。再加上套管的高度过高、质量较大、制作工艺复杂，目前国内还没有自主生产特高压等级的套管，虽然国外已有生产能力，但造价昂贵。国内的工程建设正在向特高压等级发展，为特高压等级的套管研究和制造奠定了基础。

现阶段，国外复合绝缘子领域主要是发展完善的生产技术，以提高绝缘层的抗压强度和绝缘层材料的利用率，努力降低制造成本。我国和国外复合绝缘子产业的发展仍存在一定差异。海外资金已经投资于复合绝缘子用于特定用途，最大额定电压已达 1 200 kV。日本 NGK 公司生产的绝缘子普遍具有电压等级高、特性稳定和质量高的特点，其绝缘子的科学研究和制造标准一直处于世界领先水平。德国西门子高压电气设备公司生产的套管由于其完美的制造工艺而被广泛用于各种工程项目中。在我国的三峡工程中，采用的 500 kV 复合硅橡胶套管是 HSP 公司的产品。瑞士的 MICAFIL 公司已能够生产出 765 kV 及 1 050 kV 电压等级、额定电流为 1 000 ~ 2 000 A 的特高压绝缘套管，该公司生产的产品最长的运行时间已经达到 15 年；传奇德国公司、瑞士 ABB、日本 NGK 以及英国 BUSHING 等公司均已经能够生产特高压等级的套管。国际上普遍采用的复合套管，通常芯筒都是由玻璃纤维增强塑料制作而成，伞套是由硅橡胶制成，最后将芯筒和伞套相粘接组成套

管,而套管的外绝缘则采用 LSE 硅橡胶。

由于高压绝缘套管的广泛应用,国内外也相继研究专门用于套管设计的软件,目的是简单高效地实现套管的整机设计。主要的软件有 IST(Insulator Selection Tool)、LPE(Line Performance Estimator)等,这些软件能完成绝缘套管的外绝缘设计功能。关于套管外绝缘的设计方法,目前国际上尚没有一套完整统一的理论,国外 IEC 60815 提出了 3 种方法,CIGRE 158 也提出了两种方法,而这些方法的有效性还有待进一步证明。因此研发具有自主知识版权且有效可行的套管绝缘设计软件,具有理论和工程实际意义。

(2)高压套管绝缘材料

随着电压等级的升高,在进行电气设备绝缘设计时,对电气设备所采用的绝缘材料的绝缘可靠性提出了更高的要求。早期的绝缘套管采用的外绝缘材料均为瓷材料。瓷材料的介电常数高,有很强的绝缘能力。但同时也存在许多不足之处,如瓷材料的亲水性,雨水容易在套管表面聚集,并且也容易受到污秽的影响;瓷材料的密度相对较大,导致套管整体质量较大;此外,瓷材料脆,容易断裂,导致套管外闪;同时瓷材料的这些特性也给运输造成很大的困难。复合绝缘套管与单一绝缘套管相比,需考虑主绝缘材料,其主要作用为浸渍、散热以及提高套管内绝缘电晕起始电压,主要有绝缘油(矿物油、植物油和合成油等)、环氧树脂及 SF_6等。

1)绝缘油

矿物油是原油的分馏物质。由于其优异的电气设备特性、散热性能,矿物油现已成为电气设备中使用时间最长且市场份额较大的一种绝缘油。现阶段,在超高压和特高压输电行业中,矿物油仍然是最理想的绝缘油。其组成成分包括直链烷烃、异构烷烃、环烷烃和芳烃。而在这几种烷烃中,闪点高、凝点低、性能稳定、不易受潮是异构烷烃和环烷烃的优点,是用于制作理想矿物绝缘油的主要成分。

植物油是通过对纯天然油料作物提取和精炼而制成的绝缘油,主要成分是甘油三酯。它具有可重复再生、易降解的优点。在现阶段,关于使用植物油代替矿物油的研究尚在进行。根据国际电工委员会标准,由于其优异的防火性能,植物油可列为 K 级液体,为高燃点绝缘油。

合成酯油是一种合成油,其主要成分为多元醇酯基础油,具有很好的高低温性能、防潮性能和可降解性,目前主要用于海上风电的高压绝缘。合成酯油的分子极性较强,对水分子的亲和力也较强,因而具有很强的耐湿性能,在高水含量的环境中也能保持良好的绝缘水平。此外,合成酯的酸值较小,氧化诱导期更长,具有更好的抗老化能力,能延长更换周期。

2)环氧树脂

环氧树脂具有良好的电气绝缘性能和化学性能,且成本低,因而广泛应用于干式套管、胶纸电容套管。在某些领域,要求环氧树脂材料除满足基本的绝缘性能

外,还要有良好的耐高温性能,因而常通过导入新结构或共混、共聚的方法改善其热物性。如国内有学者在采用增加环氧树脂官能度的方法后,使其固化物的分解温度提高到 365.9 ℃。也有学者使用有机硅将环氧树脂改性后,使其固化物的分解温度提高到 490.5 ℃。此外,根据研究,环氧树脂的放电起始场强与温度、间隙均呈负相关关系,即温度或间隙增大都会降低环氧树脂绝缘的可靠性。此外,随着温度升高,环氧树脂的分子结构会发生断裂,进而使环氧树脂固化物产生软化、变形,伴随该过程发生的热氧化反应还会继续破坏环氧树脂的分子结构,影响其电绝缘性能。

3)SF_6气体

SF_6气体是一种性能良好的绝缘气体,由于其较大的分子直径和强电负性,能有效阻碍气体放电,并提高绝缘击穿电压,同时因其具有不燃的特性,常被用作灭弧介质。由于 SF_6气体出色的介电性能和冷却性能,使用 SF_6气体的高压电器都具有体积小、质量轻、空间利用率高和安装运行方便的特点,目前 SF_6已广泛应用于各种高压电器。

近年来,国内外开始广泛采用绝缘性能相对较好的复合材料。复合绝缘子的质量比瓷绝缘子轻得多,因此,相比于瓷套管更有利于运输和抗震。此外,复合绝缘子具有优异的疏水性,可以避免在阴雨天气下产生雨帘,防止雨滴积聚在绝缘子的表面,同时其具有可靠的电气绝缘性能、不易发生湿闪以及有出色的污秽工作能力。另外,复合绝缘子的机械性能也非常稳定且不易破裂,为运输提供了极大的便利。同时,在实际的操作中,套管还具有很好的防爆特性。除此之外,复合绝缘子还有很好的抗紫外线性能。复合绝缘子的诸多优良性能使其应用范围越来越广,复合式套管正在广泛应用于不同的高压电气设备中。有很多国际上知名的大公司,目前都在变相进行复合绝缘子的研制,如日本 NGK 公司、法国 SEDIVER 公司等。这些公司原来都是以瓷绝缘子或者玻璃绝缘子为主要生产产品的公司。基于上述分析,复合式绝缘子的应用将成为高压套管研发的新趋势。

通过以上介绍,我们可以知道,电网中广泛应用的是油纸套管,其采用绝缘纸和变压器油作为内绝缘,瓷套作为外绝缘;油纸套管具有绝缘利用系数高、介质损耗低和比电容大等优点,同时也存在漏油、套管内部进气进水、绝缘纸受潮、瓷套开裂、防污闪能力弱、维护工作量大等缺点。高压套管有从油纸套管向干式套管过渡的趋势,干式套管生产工艺要求较高,技术被国外长期垄断,我国高压套管曾一度全靠进口,对其在运行电压下的绝缘性能研究比较少,因此,有必要开展对绝缘套管在运行电压下绝缘性能的试验研究。

1.2.3　高压套管电气和化学特性

目前对套管内绝缘的电气特征参量测试主要包括绝缘电阻和吸收比、介质响