

有关高压直流绝缘设计问题的探讨

何 平¹, 刘学忠², 王 欣¹, 王 珏²

(1.南京电气(集团)有限责任公司, 南京 江苏 210038;

2.西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 本文根据直流套管生产的技术要求, 对直流套管的绝缘设计进行了初步分析和探讨, 研究了直流套管用内绝缘材料的含水率、温度对绝缘性能的影响, 以及外绝缘污秽、套管实际运行条件等对直流电场分布的影响, 探讨了减少对直流绝缘性能影响的措施和直流套管的绝缘设计方法。

关键词: 直流套管; 绝缘性能; 绝缘设计; 电场分布; 分析

0 前言

为了解决我国能源分布与经济发展在地域上极不均衡的问题, 有关长距离、大容量、在输电上具有优异经济效益的超高压、特高压直流输电技术的研究和应用正迅速地进行和发展^[1-3]。虽然有关直流输电技术的研究在我国起步较晚, 但随着投建的直流工程不断增多, 相关的各种研究和应用也在逐渐深入。

1 交、直流绝缘设计的对比

与交流场强下的绝缘设计相比, 直流绝缘设计的最大不同是其绝缘中的电场分布的影响参数不同, 即交流场强下绝缘中的电场分布是按各绝缘(层)中的相对介电常数(ϵ_r)大小确定; 而直流场强下绝缘中的电场分布是由各绝缘(层)中的电导率 γ 大小确定。虽然其电场分布的表达公式的形式相同, 见下式(1)与式(2), 但由于 ϵ_r 和 γ 两个参数受温度、湿度等因素影响的差异, 造成直流绝缘中的电场分布设计, 虽然在形式上可以参照交流设计的电容均压原理与方式进行初步设计, 但在总体绝缘结构设计和模拟产品运行条件的验算中必须考虑由于这些差异对产品带来的影响。而相关绝缘材料在直流条件下、各影响因素对其电导率的影响量, 可以通过对该材料的基础研究试验数据获得。

$$\frac{E_{i\max}}{E_{i-1\max}} = \frac{\epsilon_{i-1}r_{i-2}L_{i-1}}{\epsilon_i r_{i-1}L_i} \quad (1)$$

$$\frac{E_{i\max}}{E_{i-1\max}} = \frac{\gamma_{i-1}r_{i-2}L_{i-1}}{\gamma_i r_{i-1}L_i} \quad (2)$$

2 绝缘中含水率和温度的影响

2.1 纸中含水率和温度对油浸纸的影响

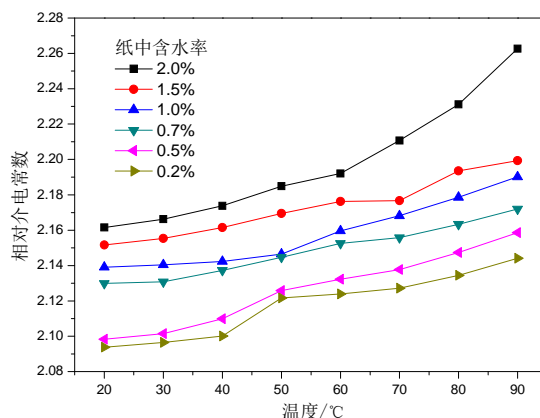


图 1 几种含水率油浸纸试样的相对介电常数与温度的关系

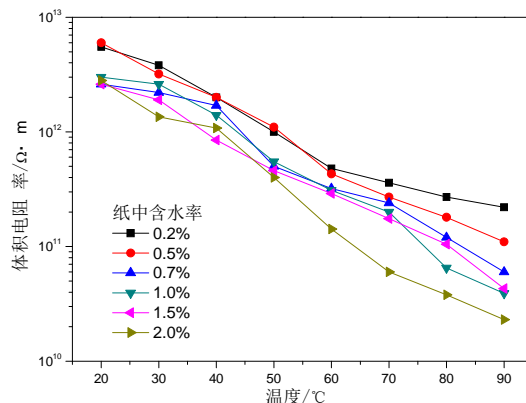


图 2 几种含水率油浸纸试样的体积电阻率与温度的关系

在交流场强的绝缘系统中, 绝缘各部分中的含水率的差别, 对介电常数的变化影响很小, 即使在含水率可能会存在较大差异变化(如因受潮或工艺处理不良等原因造成)的油纸绝缘中, 这种变化差

异的影响也是微不足道的,包括温度变化对介电常数的影响也很小(见图1)。油纸绝缘中含水率从0.2%变化到2.0%,介电常数的差别不大于4%;同样,温度变化差别60℃,介电常数 ϵ_r 的差别不大于5%。但是绝缘中含水率的不同对材料的体积电阻率大小的影响却十分明显,图2是油纸绝缘中不同含水率时的体积电阻率值,以及温度变化对其电阻率大小的影响。其中含水率对电阻率影响已经达1倍或数倍;而温度的影响更大,含水率为0.2%的油纸绝缘为例,温度相差60℃时,电阻率的差别已超过10倍。

2.2 温度对环氧浸纸的影响

相对于油纸绝缘,环氧浸纸绝缘的体积电阻率随温度的变化虽然没有那么明显,但比交流情况下温度对介电常数的影响还是要大一个数量级以上。图3为环氧浸纸绝缘的体积电阻率随温度变化的曲线。

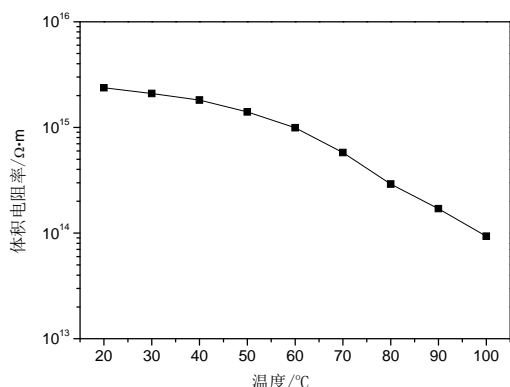


图3 环氧浸纸试样的体积电阻率与温度关系

3 外绝缘(污秽)等因素对直流产品绝缘性能的影响

3.1 外绝缘(污秽)的影响

由于直流系统中电场分布的特性,直流套管类产品的外绝缘污秽和外绝缘上的局部受潮(局部为干区)等问题对产品绝缘性能的影响比交流电场下要严重很多;而且在直流电场中,产品外表面的集污效应使其外绝缘表面比交流下更容易产生污秽。据国外有关文献报道,对采用瓷套做为外绝缘的直流产品,如果在外绝缘上没有采取相应有效的防护措施,在上述极端特殊的试验条件下,无有效防护措施的产品其闪络电压比采取涂有RTV的产品降低一半左右。因此,目前国内外提高直流产品外绝缘性能的通行方法:一是提高产品外绝缘的干弧距

离(即爬电距离),二是改善产品外绝缘的憎水性,或直接采用硅橡胶类复合材料作为产品外绝缘的主要材料。

3.2 其它运行条件对产品性能的影响

由于绝缘材料的电阻率对运行条件(如环境温度、运行的功率负荷等)比较敏感,在产品的设计中应通过合理的参数选择和结构布置,尽量减少或弱化这些因素对产品的影响。这包括导体的电流密度选取、合理的散热结构设计,以及作为主绝缘材料本身的选择等。

直流套管类产品在运行中还会遭受正负电压极性发生转换等比较苛刻的运行条件,该极性反转的时间短时,由于空间电荷的存在(来不及放电衰减),将造成直流套管内部局部绝缘中所承受的场强成倍增加;特别是绝缘中各部分的电阻率差别大时,这种局部的不均匀性表现的将会更明显。另外由于直流系统的自身特点,直流产品周围的高低电压电极对其产品本身的绝缘性能的影响大于交流系统;因此在直流产品的设计中要考虑到这些可能带来的影响,并采取适当的结构和屏蔽措施以削弱这些影响。

4 减少对直流绝缘性能影响措施的讨论

4.1 含水率影响的控制

直流绝缘中含水率的控制和变化主要决定于产品的工艺处理过程,虽然运行中的一些异常原因可能也会使绝缘中的含水率增加,但由于这种情况发生的概率相对较低,因此,要减少或避免绝缘材料中含水率对其直流电气性能的影响,应制订有效合理的绝缘处理工艺,使所制造完成的绝缘中含水率足够低,同时还要尽量保持绝缘内层和外层的含水率基本一致,使内外绝缘具有相近的含水率。

特别是超高压和特高压产品,由于绝缘制造绕包的时间长、绝缘层厚,不论是对于控制绕制过程的吸潮、或后期的干燥处理,为了避免处理温度过高造成绝缘的老化,和处理周期过长引起的成本与效率的问题,需要大量的经验和数据的积累。

4.2 通过合理的结构设计减少温度等因素的影响

绝缘材料的电阻率是随着温度的增加而降低的。以直流套管为例,在电极(容)屏形式均压的绝缘结构中,其各极板间的电场度是不可能做到完全相等,但如果在设计上能做到使套管靠近导电管附近的极板间绝缘中电场强度略大于其它部位的场强,当运行中导电管发热时所带来的电阻率负效应,

就可以降低这种设计上的较高的场强。而相关于不同绝缘材料的这种设计上的预先考虑的场强比率系数,将有助于改善直流套管的实际使用性能。图 4 为没有考虑导电管发热时、200kV 直流套管极板间电场分布的一个计算实例,但如考虑到导电管发热而造成的绝缘电阻的变化,其电场分布变化趋势则如图 5 所示。

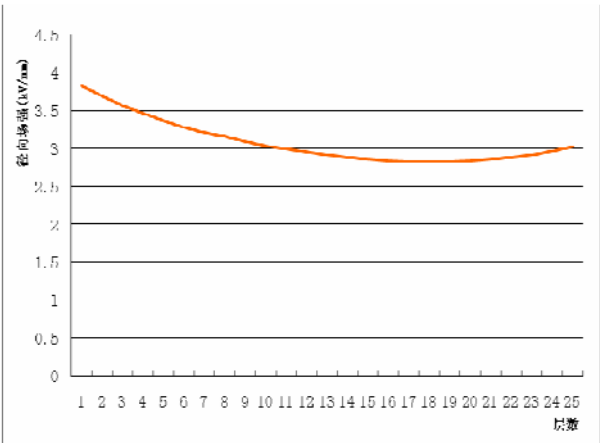


图 4 200kV 直流套管中的电场分布

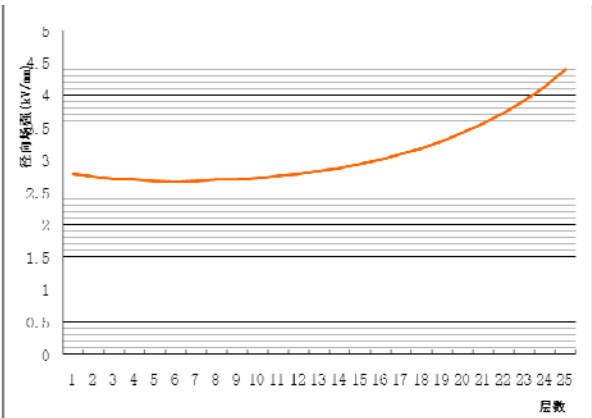


图 5 考虑温度影响时直流套管中电场分布变化

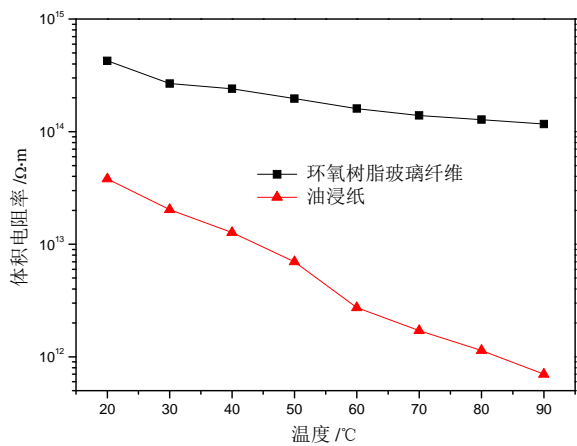


图 6 两种试样的体积电阻率与温度关系

与之同理,通过对直流套管等产品在极性反转情况下的特性研究,了解极性反转时对套管各绝缘部位场强变化的一些影响,在设计中也能予以适当考虑,以减少这些影响,或对绝缘进行局部加强,将可以提高套管的直流绝缘性能或提高产品的运行寿命。

4.3 绝缘材料的选择

在直流绝缘系统中电场强度的分配由电阻率决定,绝缘材料的电阻率其受含水率、温度等的影响远大于对介电常数的影响,如能够选择一种电气性能良好、对以上因素变化又不太敏感的绝缘材料用于直流绝缘系统中,将可以改善直流套管等产品的直流电场下的绝缘性能。基于这种思路,对几种常用的绝缘材料的基本参数性能进行了研究试验,其中环氧浸渍玻璃纤维绝缘的体积电阻率随温度的变化率大大低于油纸绝缘,见图 6 所示。

5 结论

绝缘纸中不同的含水率对油浸纸介电常数的影响小于对其体积电阻率的影响,所以直流产品对含水率的控制应该更加严格,尽量保证绝缘内层和外层含水率一致。对直流产品的外绝缘应采用必要的屏蔽措施和结构优化;利用电阻率的热效应和预先考虑场强的比率系数,有利于改善直流套管的实际性能。在绝缘材料选择方面,温度升高时环氧树脂玻璃纤维的体积电阻率的数量级和稳定性均优于油浸纸。

参考文献:

[1] F.Hammer, A. Kiichler. Insulating Systems for HVDC Power Apparatus[J], June 1992, IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27 (3): 601-609.

[2] Peng Liu, Zongren Peng, Li Cao, et al. Electric Field Calculation and Structural Optimization of ±800kV Converting Transformer Bushing Outlet Terminal[C]. Properties and Applications of Dielectric Materials, 2006. 8th International Conference on, June 2006, 840-843.

[3] 刘鹏,金海云,石惠承,等. 特高压直流套管用环氧树脂/皱纹纸复合绝缘体系介电性能的研究[J]. 高压电器,2009,45(6):6-8.

作者简介:

何 平, 南京电气(集团)有限责任公司, E-mail: 13505178030@163.com.