基于有限元方法的相对介电常数和电阻率对套管状态参数的仿真计算研究

深入开展绝缘材料的电阻率和介电常数对变压器套管的状态参数（如电容、介质损耗和绝缘电阻）的影响研究，对提高套管的故障诊断和变电站主变压器的安全可靠性运行具有重要的意义。为此，基于有限元方法开展了相对介电常数和电阻率对套管电容、介质损耗和绝缘电阻的仿真计算研究，通过研究发现：套管中油的介电常数和电阻率对套管电容、介质损耗和绝缘电阻影响较小，而两个电容屏之间油纸绝缘的相对介电常数和电阻率对套管电容、介质损耗和绝缘电阻影响较大。

周天春／电力规划设计总院
彭庆军　黄　星／云南电网有限责任公司电力科学研究院
姜雄伟／重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室
孙兆臣／云南电网有限责任公司大理供电局



周天春／高级工程师

关键词／Keywords
有限元方法·
油纸绝缘介电常数·
油纸绝缘电阻率·
变压器套管·

0　引言

变压器套管是最容易出现故障容性的设备之一[1-5]，套管故障约占变压器故障总量的30%[6]，而根据中国电力科学研究院的统计发现这一比例近几年有加剧的趋势，变压器套管故障一旦出现，轻则引起跳闸，重则将导致主变压器发生火灾[7]，因此，近几年针对变压器套管的研究逐渐成为热点。

据统计，油纸电容型套管故障的原因主要有绝缘受潮、制造工艺缺陷、渗油漏油和绝缘老化等[8-10]，其中由绝缘受潮引发的事故位居前列[11]。虽然绝缘受潮导致的套管故障和异常不一定构成事故，但异常情况如果不能及时处理，通常会导致非常严重的后果，如2015年南方电网某省500 kV变电站因为套管顶部密封性能下降，潮气或者雨水进入导致主变压器故障跳闸，并引发爆炸、起火事故。因此，必须提高套管的检测手段，及早发现问题并消除隐患。目前针对套管内部绝缘状态的检测方法可以分为两大类：一类是针对材料的检测，如油色谱、油中微水[12]、油电阻率[13-14]和油的介电常数特性[15]；一类是针对套管整体参数的检测，如介质损耗（以下简称介损）[16]、电容量[17]和绝缘电阻[18]。虽然从理论上讲两种检测之间必定存在定量关系，如图1所示，套管的整体参数可以根据设计数据和材料参数计算得到，但是由于设备运行单位缺乏必要的设计参数，导致实际运维单位只能作定性分析，同时套管制造厂家由于无法获取实际材料运维中的参数，因此无法开展运行中材料的老化特性对套管整体参数的影响特性研究。此外，由于在运的套管中绝缘纸无法取样，因此在材料参数检测中只能对油作检测分析，但是不同的材料绝缘状态对整体参数的影响规律还不是很明确，如2013年英国一起138 kV高压套管故障，解剖后纸绝缘中水分测试结果为3.5%，远远超过允许的1%，但介损测试结果为0.56%，小于最高允许值0.7%，标准之间缺乏定量的一致性，导致套管绝缘状态判断的模糊性，不利于生产运行单位对套管状态的判断。因此深入开展套管材料参数对套管的整体参数（如介损、电容量和绝缘电阻）的研究，对提高套管的运行水平具有重要的

中国电机工程学会青年人才托举工程：JLB－2017－288，国家重点研发计划“重大科学仪器设备开发”重点专项高重复频率高压脉冲源研制与产业化项目（2017YFF0104300），中国博士后科学基金资助（2014M552552XB）。

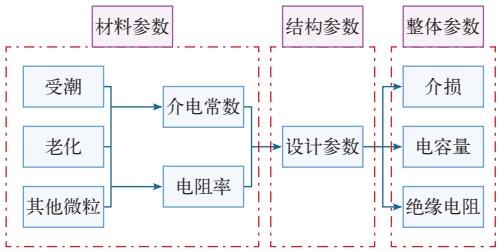


图1　套管各个参数之间关系

意义。

1　计算模型

1.1　几何模型和控制方程

由于套管具有轴对称结构，本文采用二维的轴对称建立套管计算分析模型，几何模型如图2所示。该模型中套管有25个屏，每个屏的屏长如图3所示，直径如图4所示，下端距如图5所示。针对该模型建立的有限元计算模型如图6所示，其中区域①是绝缘油部分；由于电容屏的厚度近似忽略，此处利用图中边界②表示；两个电容屏之间是绝缘油纸，如图6中区域③所示，由于这部分主要是纸，

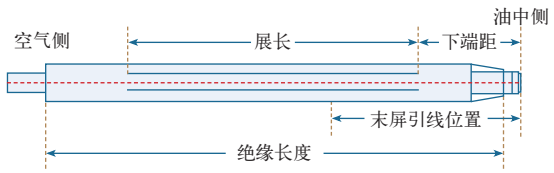


图2　模型套管几何结构

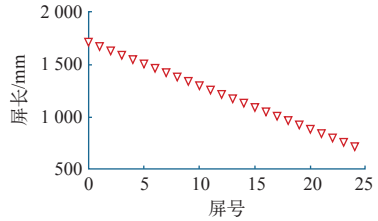


图3　模型套管各个屏屏长

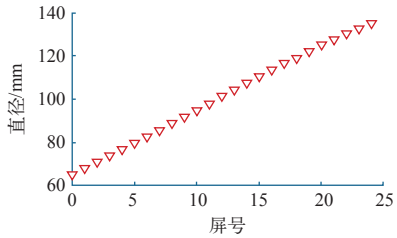


图4　模型套管各个屏直径

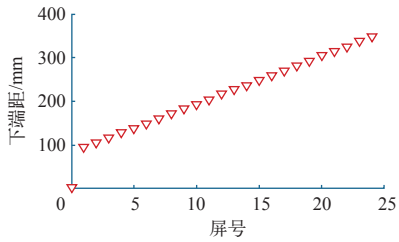


图5　模型套管各个屏下端距

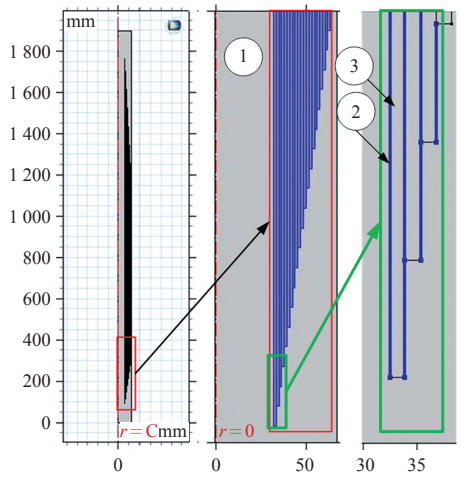


图6　计算几何模型

下文简写为“纸”。对于电容类的电场一般采用电准静态场的电磁场方程组，控制方程组如下

$$\vec{E} = -\nabla V \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \left(\frac{\vec{E}}{\rho} + \mathrm{j}\omega\varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E} + \vec{J}_e \right) = 0 \tag{2}$$

式中，$\vec{E}$为电场强度；V为电动势；ρ为电阻率；j为虚数；ω为电源频率；ε_0为真空介电常数；ε_r为相对介电常数；$\vec{J}_e$为外部电流密度。

电容屏采用悬浮电位边界条件，材料参数设置如表1所示。本文计算软件平台为有限元软件COMSOL Multiphysics®4.1，计算机处理器为I7－3770，内存32 GB。

表1　材料参数

	相对介电常数	电阻率/(Ω·m)	频率/Hz
油纸绝缘部分	3.6	1×10^{14}	50

1.2　网格划分

本文计算模型的网格划分如图7所示，在两电容屏中间的绝缘纸上采用网格加密，利用软件的网格统计分析发现本文模型的网格平均质量约为

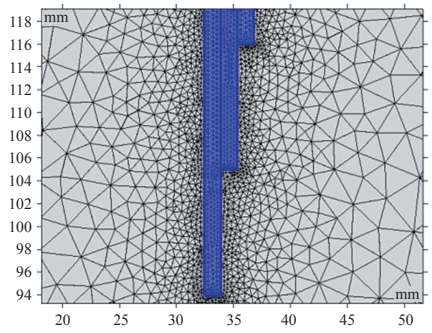


图7 网格划分

0.86[19-20]，这说明本文网格划分的质量较高。

2 计算结果分析

2.1 相对介电常数对套管电容量和介损的影响分析

为了便于后面的分析研究，首先分析一下本文模型计算的可靠性，根据厂家计算材料参数和几何参数，本文计算得到的本套管电容量约为330.29 pF，厂家计算单上本套管的电容量约为334.0 pF，相对计算单本文计算误差为1.1%，而套管设计值与实测值之间工艺误差一般控制在5%，本文计算结果满足该要求，因此该模型具有可靠性。

表2和表3为油纸绝缘电阻率为11×10^{14} Ω·m时相对介电常数对套管电容量变化情况，其中图6中区域①的绝缘油的相对介电常数对套管电容量的影响较小，近似忽略不计，但是图6中区域③绝缘纸的相对介电常数对套管电容量的影响非常大，误差相对达到了8.53%。

表2 电容量随油的介电常数变化

油介电常数ε_r	3.5	3.6	3.7	3.8
电容量/pF	330.247	330.291	330.335	330.378
误差(%)	–	0.013	0.027	0.040

表3 电容量随纸的介电常数变化

纸介电常数ε_r	3.5	3.6	3.7	3.8
电容量/pF	321.160	330.291	339.423	348.552
误差(%)	–	2.84	5.69	8.53

电容量是介电常数的线性函数，因此，电容可以表述为

$$C=\varepsilon_0\varepsilon_r f(r) \tag{3}$$

式中，ε_0为真空介电常数；ε_r为相对介电常数；而$f(r)$为与结构有关的函数，定义为电容结构函数，该结构函数在结构不发生变化时为恒定值。

对于套管的电容可以近似表示为纯油电容和油纸电容两部分电容的并联，即

$$C_{sum}=C_{oil}+C_{paper} \tag{4}$$

其中

$$C_{oil}=\varepsilon_0\varepsilon_{oil}f_{oil}(r) \tag{5}$$

$$C_{paper}=\varepsilon_0\varepsilon_{paper}f_{paper}(r) \tag{6}$$

所以

$$C_{sum}=\varepsilon_0\varepsilon_{oil}f_{oil}(r)+\varepsilon_0\varepsilon_{paper}f_{paper}(r) \tag{7}$$

根据表2可得套管的电容C_{sum}几乎不受油的相对介电常数ε_{oil}的影响，这说明$f_{oil}(r)\approx0$，因此

$$C_{sum}\approx\varepsilon_0\varepsilon_{paper}f_{paper}(r) \tag{8}$$

套管在新投运时电容量表述为

$$C'_{sum}\approx\varepsilon_0\varepsilon'_{paper}f_{paper}(r) \tag{9}$$

套管运行一段时间的电容量表述为

$$C''_{sum}\approx\varepsilon_0\varepsilon''_{paper}f_{paper}(r) \tag{10}$$

由此可得

$$\frac{C'_{sum}}{C''_{sum}}\approx\frac{\varepsilon_0\varepsilon'_{paper}f_{paper}(r)}{\varepsilon_0\varepsilon''_{paper}f_{paper}(r)}=\frac{\varepsilon'_{paper}}{\varepsilon''_{paper}} \tag{11}$$

因此套管电容量变化率近似表述为两个电容屏油纸绝缘部分的相对介电常数的变化率，根据油纸部分的相对介电常数和油纸中受潮的函数关系可以分析套管的受潮情况。

图8和图9为油纸绝缘系统相对介电常数3.6时相对绝缘电阻率对套管电容量。由图中可以看出，在油纸绝缘系统相对介电常数固定不变时，绝缘电阻率对套管电容量的影响可以忽略不计。但是同种油纸绝缘材料实际运行中这种情况较为少见，因为一般绝缘电阻率的变化往往是受潮影响，而受潮时一般会导致油纸绝缘系统相对介电常数也随之发生变化，而不同的油纸绝缘材料这种情况可能发生，但是由于其电容量的影响较小，故可以忽略不计。

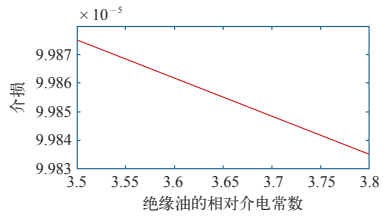


图8 介损随油介电常数变化

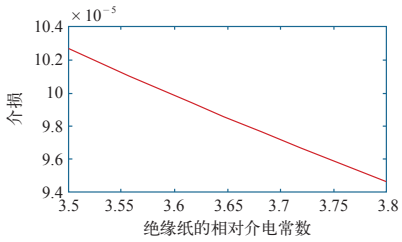


图9 介损随纸介电常数变化

2.2 电阻率对套管介损的影响分析

油纸绝缘相对介电常数为3.6时计算发现电阻率对套管电容量没有影响，这主要是因为套管的电容量只与套管绝缘材料的相对介电常数有关。整体上绝缘材料的电阻率对套管的介损影响较大，其中绝缘油的电阻率改变能够引起介损较为明显的变化，如图10所示；而绝缘纸的电阻率对套管的介损影响更大，如图11所示。

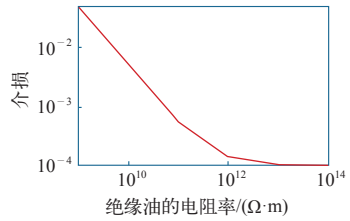


图10 介损随绝缘油电阻率的变化

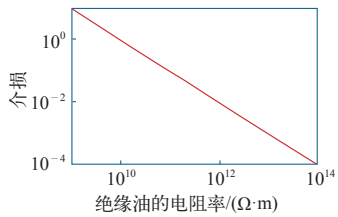


图11 介损随绝缘纸电阻率的变化

2.3 电阻率对套管绝缘电阻的影响分析

表4和表5为绝缘材料的电阻率对套管的直流电阻的影响，其中绝缘油的电阻率对套管绝缘电阻的影响较小，绝缘纸的电阻率对套管绝缘电阻的影响较大。因此在实际运行中测量套管绝缘电阻变化较大时，说明其绝缘系统中绝缘纸的电阻率已经发生变化。

表4 绝缘电阻随绝缘油的电阻率变化

电阻率/Ω·m	10^{14}	10^{13}	10^{12}	10^{11}	10^{10}	10^{9}
绝缘电阻/GΩ	4 818.6	4 818.6	4 818.4	4 815.6	4 667.1	1 958.6
误差倍数	1	1	1	1.000 6	1.032 5	2.460 2

表5 绝缘电阻随绝缘纸的电阻率变化

电阻率/Ω·m	10^{14}	10^{13}	10^{12}	10^{11}	10^{10}	10^{9}
绝缘电阻/GΩ	4 818.6	4 812.7	4 315.2	950.7	97.0	9.7
误差倍数	1	1.001 2	1.116 7	5.07	49.68	496.76

类似于套管的电容特性，绝缘电阻也是电阻率的线性函数，因此，绝缘电阻可以表述为

$$R=\rho g(r) \tag{12}$$

式中，ρ为电阻率；$g(r)$为与结构有关的函数，类似于电容的结构函数，$g(r)$定义为绝缘电阻结构函数，同理结构函数在结构不发生变化时为恒定值。

对于套管的绝缘电阻也可以近似表示为纯油绝缘电阻和纸绝缘电阻两部分绝缘电阻的并联，即

$$R_{\text{sum}}=R_{\text{oil}}+R_{\text{paper}} \tag{13}$$

其中

$$R_{\text{oil}}=\rho_{\text{oil}}g_{\text{oil}}(r) \tag{14}$$

$$R_{\text{paper}}=\rho_{\text{paper}}g_{\text{paper}}(r) \tag{15}$$

所以

$$R_{\text{sum}}=\rho_{\text{oil}}g_{\text{oil}}(r)+\rho_{\text{paper}}g_{\text{paper}}(r) \tag{16}$$

根据表4可以看出，在ρ为$10^{14}\sim10^{10}$ Ω·m的范围内套管的绝缘电阻R_{sum}几乎不受油的电阻率ρ_{oil}的影响，此外由于纸的吸潮较油的大，因此一般情况下，当油的电阻率降低时，纸的降低会更大，即纸的影响较油的影响更大，在$\rho=10^{9}$ Ω·m时纸的影响较油的影响大201.9倍，因此也可以近似认为$g_{\text{oil}}(r)\approx0$，即

$$R_{\text{sum}}\approx\rho_{\text{paper}}g_{\text{paper}}(r) \tag{17}$$

套管在新投运时绝缘电阻为

$$R'_{\text{sum}}\approx\rho'_{\text{paper}}g_{\text{paper}}(r) \tag{18}$$

套管运行一段时间的绝缘电阻为

$$R''_{\text{sum}}\approx\rho''_{\text{paper}}g_{\text{paper}}(r) \tag{19}$$

可得

$$\frac{R'_{\text{sum}}}{R''_{\text{sum}}}\approx\frac{\rho'_{\text{paper}}g_{\text{paper}}(r)}{\rho''_{\text{paper}}g_{\text{paper}}(r)}=\frac{\rho'_{\text{paper}}}{\rho''_{\text{paper}}} \tag{20}$$

因此套管绝缘电阻变化率近似表述为两个电容屏纸绝缘部分电阻率的变化率，根据纸部分的电阻率和纸中受潮的函数关系可以分析套管的受潮情况。

3 结束语

本文基于有限元方法开展了相对介电常数和电阻率对套管电容、介损和绝缘电阻的仿真计算研究，通过分析得出以下结论：

1）在绝缘材料电阻率较好的情况下，油和纸的相对介电常数分别在3.5～3.8范围内变化时，油导致电容最大变化仅为0.040%，而纸导致电容最大变化可达8.53%，油和纸的相对介电常数分别从3.5～3.8变化时对介损的影响可以忽略。

2）在绝缘材料相对介电常数一定的情况下，绝缘材料电阻率的改变仅能够对介损有影响，而对电容无影响，且纸绝缘部分对介损的影响相对油部分更大。

3）油和纸的电阻率分别从10^{14}～10^{10} Ω·m变化时，油导致绝缘电阻最大变化为2.4602倍，而纸导致绝缘电阻最大变化为496.76倍，即纸对绝缘电阻的影响较油的影响大201.9倍，由于油的参数变化对电容和绝缘电阻的影响较小，因此可通过套管的电容值或绝缘电阻的变化率计算纸绝缘部分的水分含量。

参考文献

[1] 任晓红，王伟，郑健康，等．500 kV变压器套管典型故障及分析 [J]．高电压技术，2008，34 (11)：2513-2516．

[2] 刘勇，梁笑尘，汲胜昌，等．变压器套管容性故障对频响曲线的影响 [J]．西安交通大学学报，2014，48 (2)：62-68．

[3] 周溆，徐智，廖瑞金，等．基于云理论和核向量空间模型的电力变压器套管绝缘状态评估 [J]．高电压技术，2013，39 (5)：1101-1106．

[4] 刘恩洲，曲光磊，王晖，等．变压器套管放电引起的爆炸冲击问题的三维数值仿真 [J]．变压器，2015，52 (3)：47-50．

[5] 温定筠，张秀斌，孙亚明，等．套管异常引起的变压器局部放电超标分析 [J]．电工技术，2017 (1)：108-109．

[6] 李乃一，王明胜，杨仁毅．400 kV换流变压器阀侧套管内绝缘计算 [J]．变压器，2015 (1)：24-28．

[7] 高明．一起500 kV主变压器非典型故障跳闸的原因分析及整改 [J]．电子测试，2015 (2)：112-114．

[8] 陈璧君．纸中水分对电容型套管油浸绝缘纸热老化特性的影响研究 [D]．重庆：重庆大学，2015．

[9] 杨丽君，黄加佳，许佐明，等．高压交流套管的油纸绝缘热老化特性及寿命模型研究 [J]．电工技术学报，2016，31 (5)：144-151．

[10] 廖瑞金，吴伟强，张福州，等．复合胺类化合物对油纸系统中绝缘纸热老化特性的影响 [J]．高电压技术，2015，41 (6)：1891-1897．

[11] 林春耀，杨贤，马志钦，等．老化和水分对电容性套管绝缘纸频域介电特性的影响 [J]．南方电网技术，2016，10 (1)：18-25．

[12] 杜振波，聂德鑫，张连星，等．基于频域介电谱分析的高压套管绝缘状态评估 [J]．高压电器，2013，49 (11)：6-11．

[13] 许灵洁．绝缘油/电力设备预防性试验技术丛书 [M]．北京：中国电力出版社，2003．

[14] 朱祖清，林国庆．绝缘油介损及体积电阻率一体化测试系统研究 [J]．高电压技术，2004，30 (4)：56-57．

[15] 李晓虎，李剑，杜林，等．一种转基因菜籽绝缘油的电气性能 [J]．中国电机工程学报，2006，26 (15)：95-99．

[16] 熊俊．高压套管介质损耗及电容现场测量值分布特性 [J]．高压电器，2016，52 (6)：69-77．

[17] 何文林，叶自强．套管与绝缘子 [M]．北京：中国电力出版社，2003．

[18] 曹昌祺．经典电动力学 [M]．北京：科学出版社，2009．

[19] 朱秀娟．有限元分析网格划分的关键技巧 [J]．机械工程与自动化，2009 (1)：185-186．

[20] 陈龙，樊兴旺，王猛，等．有限元四边单元网格模型的参数化重建 [J]．计算机辅助设计与图形学学报，2017，29 (4)：680-688．

[21] 彭庆军，司马文霞，杨庆，等．初始电子浓度对空气中针板间隙正极性流注放电的影响 [J]．高电压技术，2013，39 (1)：37-43．

（收稿日期：2018－02－10）EA