

DOI:10.12158/j.2096-3203.2024.05.022

高海拔特高压变压器均压环结构设计

廖文龙¹, 丁理杰¹, 朱天宇¹, 黄治文², 张榆¹, 魏文赋²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要:特高压变压器在投运前需要进行严格的交接试验以保证其能安全可靠运行,而变压器上均压环的均压能力会影响交接试验的准确性。高海拔环境下均压环结构出现问题时其均压能力会发生变化,因此研究设计面对不同状况都能有良好均压能力的均压环尤为重要。文中首先采用 COMSOL 软件搭建了 500 kV 变压器耐压试验回路三维模型;其次研究均压环的管径、环径和环间距变化对均压环均压能力的影响;最后研究均压环在毛糙状态下的均压能力变化。研究发现在均压环管径和环径增大或环间距减小时,均压环均压能力会增强,其中管径改变带来的影响最大;均压环为毛糙表面时其均压能力会显著下降,其中粘附圆锥颗粒时均压能力下降最显著,凹陷时下降最少,说明均压环表面越平整,均压能力越好。该研究能为高海拔特高压变压器均压环设计相关工作提供一定帮助。

关键词:高海拔;变压器;均压环;电场分布;电晕放电;毛糙问题

中图分类号:TM503

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)05-0216-08

0 引言

特高压变压器在投运前需要进行雷电冲击试验、工频耐压试验等交接试验以防止设备在投运后出现设备问题或电气事故,造成不必要的经济损失和人员伤亡^[1-3]。

目前,特高压变压器一般通过添加绝缘油等方式使其设备内部有良好的绝缘性能^[4-5]。而针对变压器外部的绝缘设计包括主要绝缘子套管的设计和均压设备的设计等^[6-7]。变压器在施加高压后,其套管易产生局部高压,出现电晕、闪络等问题,影响试验准确性。面对高海拔更加恶劣的环境则要求试验有更加精确的结果,故在进行试验前要消除局部放电等因素对结果精确性的影响。为解决此问题,在变压器套管末端设计安装合适的均压设备来均衡降低局部的高压。文献[8-9]分析了国内套管的发展进程和面临的挑战,提出了套管研究的意义。文献[10-13]分析了不同均压环结构的电场。文献[14-17]分析了变压器双环结构均压环的尺寸设计及部分放电特性,得出了均压环尺寸的变化规律,但该设计研究只考虑了标准大气压下的尺寸变化,没有考虑海拔变化所带来的影响。文献[18-22]研究了在高海拔下变压器及气体绝缘组合电器耐压试验回路的仿真分析,但没有考虑均压环在毛糙状态(如存在凸起、凹陷等)下对试验回路

电场分布的影响。文献[23-24]针对大型单环均压环的起晕场强进行了预测和线路电场计算。文献[25]研究了淋雨条件下的均压环放电情况。文献[26]分析了风沙条件下均压环表面存在颗粒的情况,但主要考虑的是风沙对均压环表面粗糙的影响。综上所述,外部绝缘设计通常通过在套管末端安装均压环的方式降低较为集中的电场分布。而在涉及耐压试验等对电压有较高要求的试验中,变压器套管末端均压环的均压性能会对试验结果的准确性有直接影响。所以保证交接试验结果准确可靠的关键一步就是设计安装合理的均压环。但是目前对变压器在耐压试验回路中外侧电气性能的研究多在均压环表面光洁和低海拔的条件下进行,未考虑实际高海拔和表面毛糙对均压环均压能力的影响。

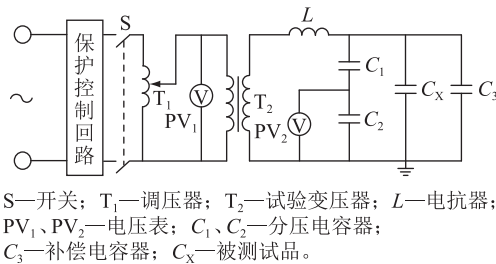
故针对特高压变压器在高海拔下进行交接试验的需求,由于高海拔下空气绝缘性能下降,导致变压器套管末端更易产生放电干扰,影响试验结果的准确性,须设计有更强均压能力的均压环。文中在该条件下研究交流耐压试验回路中均压环的设计选择。采用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件建立±500 kV 变压器耐压试验回路三维仿真模型,并通过电场分析模块来计算变压器套管末端及均压环周围电场分布情况^[27-29]。通过控制变量法分析在高海拔环境下,均压环的尺寸变化对其周围电场分布的影响,以及均压环存在瑕疵或粘附不同颗粒时对其均压能力的影响。

收稿日期:2024-02-24;修回日期:2024-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077182)

1 试验回路

交流耐压试验是最有效的一种判断变压器绝缘性能好坏的方法。利用交流电进行试验相比直流电能够同时检查正、负两种电压极性,使得试验结果更接近实际情况。文中采用可调变频式串联谐振电路进行交流耐压试验,在工频条件下,使试验回路达到谐振来测试变压器的耐压水平,如图 1 所示。由于试验所加电压往往较高,因此为了保证试验回路中各部分不会因为电压过高而发生局部放电,在变压器、分压器等部分出进线端口附近安装合适的均压环进行均压^[30-31]。



S—开关; T₁—调压器; T₂—试验变压器; L—电抗器;
PV₁、PV₂—电压表; C₁、C₂—分压电容器;
C₃—补偿电容器; C_x—被测试品。

图 1 可调变频式串联谐振电路
Fig.1 Adjustable variable frequency series resonant circuit

为了使试验结果准确可靠,试验回路中设备的局部场强必须小于起晕场强。此外,在高海拔地区,随着空气密度降低,起晕场强会减小。当海拔超过 1 000 m,而又不超过 4 000 m 时,每升高 100 m,电气设备的绝缘性能会降低约 1%,温度约降低 0.6 ℃。因此起晕场强计算公式为:

$$E_c = E_0 / (\sqrt{2} A k_a k_T) \tag{1}$$

式中: E_c 为起晕场强; E_0 为在标准大气压均匀电场下的起晕场强,取 30.3 kV/cm; A 为安全裕度,取 1.2; k_a 为海拔修正系数,如表 1 所示,标准大气压下 $k_a = 1$; k_T 为变压器在温度 T 下的修正系数,取 $1 + 0.003\,3(T - 40)$ ^[15]。

表 1 海拔修正系数参考

Table 1 Reference for altitude correction factors

海拔高度/m	修正系数	海拔高度/m	修正系数
1 000	1.00	3 000	1.25
1 500	1.05	3 500	1.33
2 000	1.11	4 000	1.43
2 500	1.18	4 500	1.54

在不同高度下,海拔修正系数如表 1 所示,可知在 4 000 m 海拔高度下, $k_a = 1.43$ 。在该海拔下取温度为 0 ℃, $k_T = 0.868$,从而可计算得到起晕场强为 12.90 kV/cm。

2 试验回路电场仿真

2.1 模型搭建

仿真采用 COMSOL 有限元软件搭建变压器耐压试验回路平台。在对设备外部进行仿真分析时,只考虑外部电场分布情况,且变压器内部有绝缘设计,箱体外部处于接地的状态,外部的电场变化主要发生在套管和均压环上,所以建模时忽略了箱体以及油箱等对试验结果中电场分布的影响。此时,模型中变压器箱体的宽度为 9.5 m,长度为 4.2 m,高压侧均压环中心离地面的高度为 16.8 m。此外,采用了更利于接线且有更好均压能力的双环结构进行模型构建和结构设计。

为了使仿真具有良好的收敛性,对模型进行合理的网格剖分。对网格的剖分须兼顾结果的精确性和计算时间的快速性,所以对不同区域进行不同细化程度的网格剖分。仿真采用了正四面体网格进行模型剖分,在均压环和套管末端这些场强变化较大的区域采用更细化的网格,如图 2 所示。

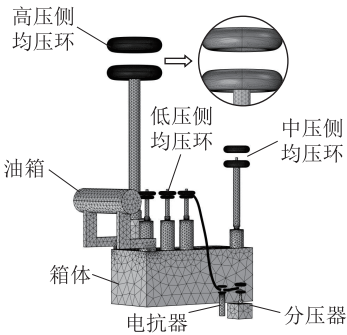


图 2 回路模型构建与网格剖分
Fig.2 Circuit model construction and grid generation

对均压环大小进行设计时,参考某 500 kV 变压器的均压环尺寸进行初始模型的构建,其中,中压侧和低压侧均压环的管径分布分别为 700 mm 和 400 mm,环径分别为 250 mm 和 100 mm(文中管径和环径都指对应的半径)。同时给定电压的初始条件,高压侧为 953 kV,中压侧为 476.5 kV,低压侧为 172.9 kV。

2.2 仿真条件及毛糙条件

在 50 Hz 工频交流电压下,各电极间的变化相对缓慢,所以在试验回路进行电场仿真分析时,可近似地将回路周围电场看成静电场。因此,仿真计算须满足的电场基本方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} \nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \\ \boldsymbol{E} = -\nabla \varphi \\ \nabla \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}_0 \boldsymbol{\varepsilon}_r \boldsymbol{E}) = 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中: \boldsymbol{D} 为电通量密度; \boldsymbol{E} 为电场强度; ρ 为电荷密度; φ 为电势; ε_0 为真空介电常数; ε_r 为相对介电系数。

在无自由电荷分布的均匀介质中,电势 φ 满足式(3)所示的拉普拉斯方程。

$$\nabla^2 \varphi = 0$$

(3)

而在定解条件下,需要满足的边界条件如式(4)所示。

$$\begin{cases} \varphi(\boldsymbol{r})|_{\Gamma} = f_1(\boldsymbol{r}_b) \\ \varphi_1 = \varphi_2 \\ \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \end{cases}$$

(4)

式中: \boldsymbol{r} 为场点位置矢量; Γ 为所给边界; $f_1(\cdot)$ 为坐标函数; \boldsymbol{r}_b 为相应边界点位置矢量; φ_1 、 φ_2 为不同介质分界面两侧的电势; ε_1 、 ε_2 为不同电介质分界面两侧介质的介电常数; n 为法线方向。

均压环在生产与使用过程中并不能做到表面绝对光洁平整,有可能会各种不同程度的凸起或凹陷。因此,考虑到这样的实际情况,文中针对不同瑕疵分别进行了模型构建,模拟存在凸起和存在凹陷的情况,如图 3 所示。

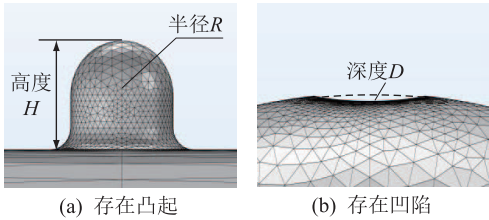


图 3 均压环自身结构问题

Fig.3 Structural issues with the grading ring itself

由于均压环在实际工作中容易粘附各种不同颗粒,而改变均压环表面均匀的结构会影响其均压能力。因此,分别构建了如图 4 所示的圆球颗粒、半球颗粒和圆锥颗粒 3 种不同形状的颗粒粘附时的模型,通过对不同模型进行分析,仿真各种情况下的最大场强变化情况。

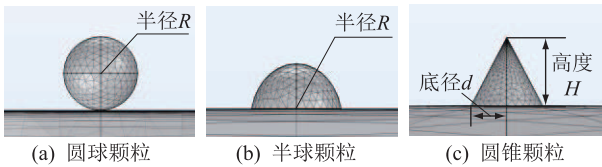


图 4 3 种形状的颗粒

Fig.4 Three shapes of particles

3 结果分析

3.1 光洁状态下电场仿真

在所预设的条件下,对整个试验回路进行电场

仿真,得到整体电场分布图,见图 5,其中 E_{\max} 为最大场强。不同尺寸结构的均压环有不同的均压效果,因此要对不同尺寸的均压环进行均压能力的测试,使得整个试验回路的最大场强都小于理论起晕场强。对试验回路电场仿真结果分析可知,在各个均压环上有较大场强,计算各部位均压环上最大场强,如表 2 所示,最大场强往往出现在高压侧的均压环中部。所以仿真通过改变高压侧均压环来分析场强变化规律,并判断是否满足该设备防晕要求。

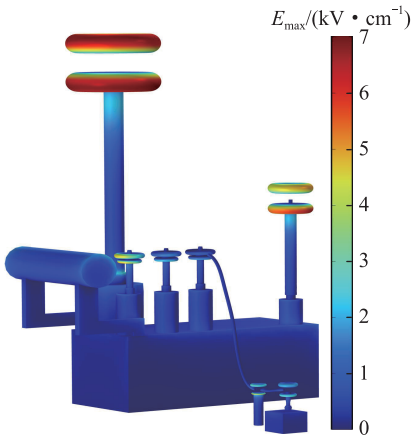


图 5 试验回路电场仿真

Fig.5 Electric field simulation of test circuit

表 2 各位置最大场强值

Table 2 Maximum field strength values at each location

位置	最大场强/(kV·cm ⁻¹)
高压侧	6.59
中压侧	4.77
低压侧	3.28
分压器	3.55
电抗器	3.48

在初步建模的基础上,先固定高压侧均压环管径为 500 mm,通过改变环径得到其最大场强变化规律。再固定均压环环径为 1 500 mm,通过改变管径得到对应最大场强变化规律,如图 6(a) 所示。通过对仿真结果的分析可知,随着管径或者环径的增大,表面最大场强都会减小,均压环的均压能力增强,且在光洁状态下,不同的管径或环径下的均压环最大场强都小于理论起晕场强。而管径变化相比环径变化对最大场强和均压环均压能力的影响更显著。

由于均压环采用的是双环结构,而双环的环间距也会影响均压环的最大场强。设定均压环管径为 500 mm,环径为 1 500 mm,通过改变环间距,仿真得到不同环间距下的最大场强,如图 6(a) 所示。分析结果可知,环间距增大,最大场强减小,但环间

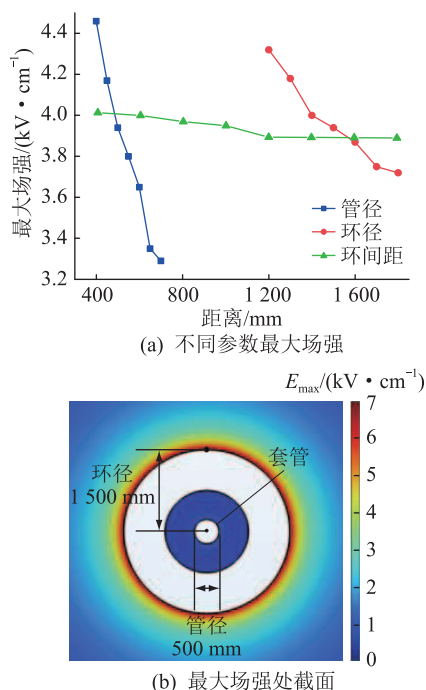


图6 改变不同参数下的最大场强

Fig.6 Maximum field strength under different parameter changes

距的变化对均压环最大场强的影响很小,所以对均压环环间距的选择主要是满足运输尺寸要求和接线要求。

在对均压环进行尺寸选择时,不仅需要其满足理论防晕要求,还需要考虑成本和运输情况。通常情况,均压环的运输尺寸(最外圆直径)不能超过4 m,故综合上述不同条件所得到的最大场强变化规律,该模型高压侧选择管径在400~550 mm、环径在1200~1600 mm、环间距在500~1500 mm的均压环。图6(b)为管径为500 mm、环径为1500 mm、环间距为1000 mm时最大场强处截面电场分布情况,此时最大场强为6.59 kV/cm,满足防晕要求。

3.2 毛糙状态下仿真分析

3.2.1 凸起或凹陷

在实际制造使用中均压环很容易出现各种瑕疵,导致表面毛糙,如出现凸起或凹陷,而这些情况会对均压环的均压能力产生不同程度的影响。因此,为了使试验回路在实际测试时不会起晕,须分析毛糙状态下的电场变化情况。文中仿真通过改变均压环尺寸参数来测试各种情况下的变化规律。通过改变管径、环径来分析不同曲率半径及高度的凸起下回路的最大场强变化情况,如图7所示。由图7可知,存在凸起时均压环会出现很大的场强分布,且凸起越高,曲率半径越小,即凸起越尖锐,最大场强越大。环径变化时设置了恒定500 mm的管

径,此时针对所建模型在凸起半径0.25 mm、凸起高度1.25 mm时,在管径为500 mm条件下很难通过改变环径使最大场强小于理论起晕场强,即若均压环上有较凸出、较尖的凸起时,很难通过改变均压环的尺寸达到均压效果。而管径变化时设置了恒定1500 mm的环径,在此条件下管径须大于450 mm,才能使最大场强满足要求。通过对仿真电场的分析可知,存在凸起的情况对均压环的均匀能力有很大影响。并且由于在高海拔地区更容易起晕,进行高海拔耐压局放实验时对均压环上是否有凸起的检查就需要更细致。

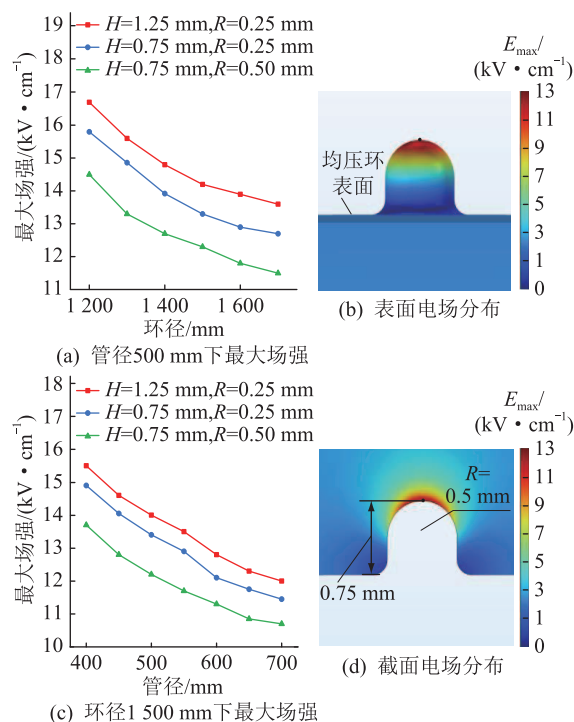


图7 存在凸起时局部电场分布及变化

Fig.7 Local electric field distribution and changes with protrusions

均压环在运输或者安装时容易出现磕碰等情况造成均压环凹陷,影响均压环的均压能力。因此仿真构建了存在凹陷时的局部模型,仿真设置长轴为250 mm、短轴为200 mm的不同深度的凹陷,如图8所示。由于在仿真分析中发现管径相比环径对最大场强变化的影响更大,所以在对凹陷进行电场分析时,设置了恒定1500 mm的环径,通过改变管径得到在不同深度的凹陷下最大场强的变化情况,如图8(a)所示。可知,存在凹陷时对均压环均压能力的影响相比存在凸起时的影响程度更小。对于所选的3种深度的凹陷,在该模型下其最大场强都不会超过理论起晕场强。

3.2.2 粘附颗粒物

(1) 圆锥颗粒。对于不同的圆锥颗粒,其底径

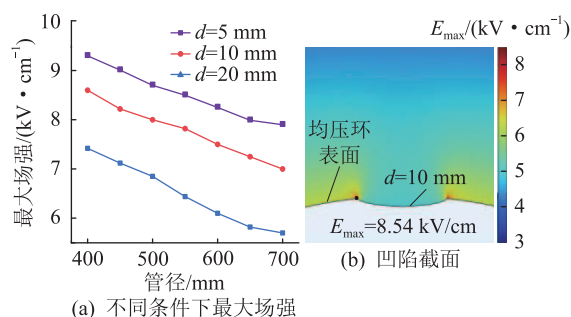


图8 存在凹陷时局部电场分布及变化

Fig.8 Local electric field distribution and changes when a depression exists

d 和高度 H 的变化都会改变其最大场强。此外,由于不同物质的颗粒也会影响其电场分布情况,所以仿真选择了砂砾(相对介电常数约为4)、石灰岩(相对介电常数约为8)和铁粒(相对介电常数约为15)3种不同相对介电常数的物质。在高海拔这种较恶劣的环境下沙砾等不同颗粒的粒径一般大于0.2 mm,岩石等颗粒一般大小为0.2~2 mm,在此情况下通过改变底径 d 和高度 H 得到不同的最大场强变化情况,如图9(a)和图9(b)所示。

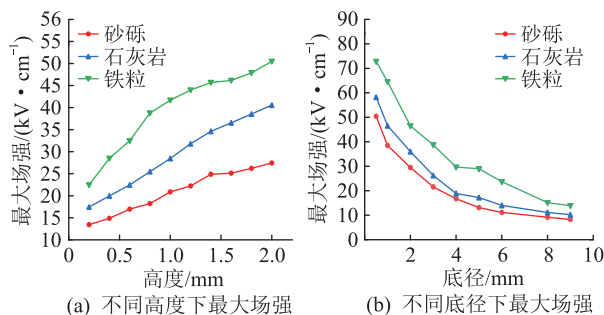


图9 圆锥颗粒最大场强变化

Fig.9 Maximum field intensity changes of conical particles

分析结果可知,相对介电常数最小的砂砾颗粒的最大场强最小,而相对介电常数最大的铁粒颗粒的最大场强最大,说明相对介电常数更小的圆锥颗粒对均压环均压能力的影响更小。圆锥颗粒的底径增大,最大场强减小,且随着底径的增大,变化趋势减小。而颗粒高度的增加,会使最大场强增大。但整体分析圆锥颗粒的最大场强规律,存在圆锥颗粒时,颗粒越尖细,回路的最大场强越大,同时存在圆锥颗粒时最大场强偏大,且大多超过了理论起晕场强,说明圆锥颗粒对均压环的均压能力影响较为明显。

(2) 圆球颗粒。当粘附颗粒为圆球颗粒时,相比圆锥颗粒多考虑了一种干土物质(相对介电常数约为3)下的颗粒,其电场截面分布,如图10所示,

通过改变颗粒的半径可以得到最大场强的变化规律。此时,通过改变圆球颗粒半径得到了不同半径下的最大场强值,如图10(a)所示。分析仿真结果可知,均压环粘附圆球颗粒时,颗粒半径越大,最大场强越小,但整体变化较小,且最大场强一直处于较高水平。同时铁粒颗粒的最大场强最大,干土的最大场强最小,即对于不同相对介电常数的圆球颗粒,其相对介电常数越大,最大场强越大,越容易起晕。

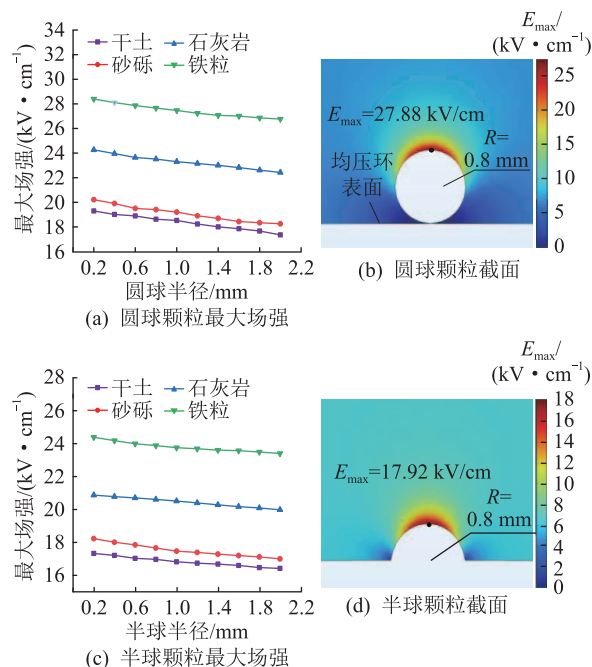


图10 圆球及半球颗粒仿真截面场强

Fig.10 Simulation cross section field strength of spherical and hemispherical particles

(3) 半球颗粒。对于半球形颗粒,给定与圆球颗粒相同变量条件,得到仿真结果如图10所示,通过改变半径得到其最大场强变化情况,如图10(c)所示。分析可得与圆球颗粒类似的规律,即颗粒半径越大,相对介电常数越小,则最大场强越小,且与圆球颗粒相比,相同半径下,半球颗粒最大场强更小。对比圆球和半球颗粒在同半径、同物质下的最大场强情况,当为干土(相对介电常数约为3)时,最大场强差约8%;当为砂砾(相对介电常数约为4)时,最大场强差约10%;当为石灰岩(相对介电常数约为8)时,最大场强差约14%;当为铁粒(相对介电常数约为15)时,最大场强差约16%。可知随着颗粒物相对介电常数增大,圆球与半球颗粒间的最大场强差就越大。

4 结论

文中采用有限元软件仿真方法分析了高海拔

地区耐压试验回路的电场分布情况,重点研究了在表面光洁和表面毛糙时均压环均压能力的变化规律,得到了以下的结论:

(1) 对于均压环的结构变化,管径和环径增大都会使均压环的均压能力增强,环间距缩小也会使均压能力增强,其中,改变管径对均压环均压能力的影响最显著,而改变环间距对其影响最小。但随着半径增大或间距缩小,其对均压环均压能力的影响效果会减小。因此对均压环均压能力进行优化设计时,在满足运输尺寸要求下,需要同时对管径、环径和环间距进行调整,优先考虑影响程度更大的管径。

(2) 均压环凸起或凹陷的存在会显著影响其均压能力。存在凸起对均压环均压能力的影响很大,且凸起越高、越细,均压环最大场强越大。而凹陷相较凸起,对均压环均压能力的影响更小,但随着凹陷的加深,其表面的最大场强也会不断增大。所以在对此类情况进行优化设计时需要定时对均压环进行检查,防止出现上述情况,从而导致产生较大电场。

(3) 当均压环表面粘附不同颗粒时,也会显著影响均压环的均压能力。相对介电常数更大的物质颗粒会使均压环表面的最大场强更大。且当为圆锥颗粒时,颗粒越尖细,高度越高,底径越小,则产生的最大场强越大。而当颗粒为圆球或半球形时,半径越大,所产生的最大场强越大。对比粘附同半径、同物质下的圆球和半球颗粒,圆球颗粒最大电场比半球颗粒最大场强约高 8%~16%,且差距随着相对介电常数增大而增大。所以针对上述结论,粘附颗粒对均压环均压能力有较大影响,在使用均压环前需要检查表面是否粘附相关颗粒。综上,对于文中的均压环高压侧尺寸,通过仿真给出的建议尺寸为管径 500 mm、环径 1 500 mm、环间距 1 000 mm 左右。

参考文献:

- [1] 金硕,朱琳,张晓星,等. 电源侧干扰信号在换流变压器对称加压试验回路中的传播特性分析[J]. 高压电器,2023,59(1):109-116,125.
JIN Shuo,ZHU Lin,ZHANG Xiaoxing,et al. Propagation characteristics analysis of source side interference signal in symmetrical voltage application test circuit of converter transformer[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(1):109-116,125.
- [2] 夏健,左杰. 变压器套管末屏适配器结构及其安全性研究[J]. 浙江电力,2022,41(8):95-102.
XIA Jian,ZUO Jie. Research on the structure and safety of transformer bushing tap adapter[J]. Zhejiang Electric Power,2022,41(8):95-102.
- [3] 赵宏成,张旭航,曹炜,等. 特高压变压器中性点经小电抗接地及其过电压保护研究[J]. 电瓷避雷器,2022(3):109-115.
ZHAO Hongcheng,ZHANG Xuhang,CAO Wei,et al. Research on neutral point grounded by small reactance and its overvoltage protection of UHV transformer[J]. Insulators and Surge Arresters,2022(3):109-115.
- [4] 郭跃东,郭丽华,郭小嫻. 主变压器本体绝缘油耐压降低的原因分析及处理[J]. 电世界,2020,61(5):34-35.
GUO Yuedong,GUO Lihua,GUO Xiaoxian. Cause analysis and treatment of voltage drop of insulating oil in main transformer body[J]. Electrical World,2020,61(5):34-35.
- [5] 朱金华,何毅帆,高久国,等. 配电网台区环保型设备电气性能研究[J]. 浙江电力,2022,41(12):46-53.
ZHU Jinhua,HE Yifan,GAO Jiuguo,et al. Study of the electrical performance of eco-friendly equipment in a distribution transformer area[J]. Zhejiang Electric Power,2022,41(12):46-53.
- [6] 陕华平,吴天博,陈晓东. 换流变压器网侧 550 kV 环氧树脂浸纸套管绝缘结构与校核[J]. 电瓷避雷器,2023(4):165-172,180.
SHAN Huaping,WU Tianbo,CHEN Xiaodong. Insulation structure design and check of 550 kV epoxy resin impregnated paper bushing at grid side of converter transformer[J]. Insulators and Surge Arresters,2023(4):165-172,180.
- [7] 刘闯,王琪林,王青于,等. 基于蒙特卡洛算法的 1 100 kV 变压器套管椭圆形双均压环参数优化设计[J]. 电瓷避雷器,2023(5):155-163.
LIU Chuang,WANG Qilin,WANG Qingyu,et al. Parameter optimization design of oval double grading ring for 1 100 kV transformer bushing based on Monte Carlo algorithm[J]. Insulators and Surge Arresters,2023(5):155-163.
- [8] 王永琪,吴广宁,刘凯,等. 变压器套管的发展历程与挑战[J]. 四川电力技术,2022,45(6):59-67.
WANG Yongqi,WU Guangning,LIU Kai,et al. Development history and challenges of transformer bushing[J]. Sichuan Electric Power Technology,2022,45(6):59-67.
- [9] HUANG S L,YAN X L,LIU Y P,et al. Research on influence factors of corona onset characteristics of AC grading rings based on three-dimensional calculation physical model[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15 (21): 2967-2977.
- [10] 房子祎,郝金鹏,伍弘,等. 220 kV 复合绝缘子均压环类型及结构对其电场分布的影响[J]. 绝缘材料,2023,56(1):51-61.
FANG Ziyi,HAO Jinpeng,WU Hong,et al. Influence of grading ring type and structure on electric field distribution of 220 kV composite insulator[J]. Insulating Materials,2023,56(1):51-61.
- [11] 申萌,王立山,王子瑜,等. 高海拔条件下 550 kV 空气绝缘隔离开关均压装置的结构优化[J]. 高压电器,2023,59(10):79-87.
SHEN Meng,WANG Lishan,WANG Ziyu,et al. Structure opti-

- mization of grading device for 550 kV air-insulated disconnector under high altitude[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 79-87.
- [12] 迟主升, 王仁, 罗振武, 等. 换流变压器阀侧绕组出线区域的电场仿真[J]. 机电工程技术, 2021, 50(8): 177-180.
CHI Zhusheng, WANG Ren, LUO Zhenwu, et al. Converter transformer iron parts induced circulating current simulation and optimization measure[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(8): 177-180.
- [13] 姜宇航. 特高压现场试验设备的选型设计与电场仿真分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
JIANG Yuhang. Selection and design of UHV field test equipment and electric field simulation analysis [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [14] 肖锐. 换流站阀厅内空气间隙均压环(双环)放电特性研究[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(11): 74-78.
XIAO Rui. Study on the air gap discharge characteristics of equalizing ring in transmission side converter station[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(11): 74-78.
- [15] 王晶, 梁曦东, 朱士全, 等. 超/特高压变压器套管端部试验用双环结构均压环设计[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1642-1648.
WANG Jing, LIANG Xidong, ZHU Shiquan, et al. Design of the dual-ring-structure grading ring on top of the EHV/UHV transformer bushing for test use [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1642-1648.
- [16] 张辉. 高压开关用绝缘套管均压环结构设计[J]. 电气时代, 2022(5): 60-62.
ZHANG Hui. Design of a grading ring structure for the insulation bushing of high-voltage switchgear[J]. Electric Age, 2022(5): 60-62.
- [17] 刘世涛, 伍弘, 郝金鹏, 等. 110 kV 棒形悬式复合绝缘子绝缘包覆均压环设计与试验研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(6): 192-200.
LIU Shitao, WU Hong, HAO Jinpeng, et al. Design of 110 kV composite insulator insulation coated grading ring and experimental study[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(6): 192-200.
- [18] 王理丽, 李子彬, 包正红, 等. 高海拔地区 ± 800 kV 换流变压器直流耐压试验回路空间电场分布仿真分析[J]. 青海电力, 2020, 39(2): 31-34.
WANG Lili, LI Zibin, BAO Zhenghong, et al. Simulation analysis of space electric field distribution in DC withstand voltage test loop of converter transformer ± 800 kV in high altitude area[J]. Qinghai Electric Power, 2020, 39(2): 31-34.
- [19] 焦保利, 郑平, 杨迎建, 等. 1 000 kV 特高压交流变电金具电晕特性及优化[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1237-1242.
JIAO Baoli, ZHENG Ping, YANG Yingjian, et al. Corona characteristics and optimizing of 1 000 kV UHV AC substation fittings[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1237-1242.
- [20] 傅智为, 林一泓, 吴勇昊, 等. 特高压 1 100 kV GIS 现场交流耐压试验技术[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 158-163.
FU Zhiwei, LIN Yihong, WU Yonghao, et al. Test technology of on site AC voltage test of UHV 1 100 kV GIS[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 158-163.
- [21] 马永福, 包正红, 王生杰, 等. 临近悬浮体影响下的均压环放电特性研究[J]. 电气技术, 2022, 23(10): 27-32, 40.
MA Yongfu, BAO Zhenghong, WANG Shengjie, et al. Research on discharge characteristics of the equalizing ring under the influence of the adjacent suspension[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(10): 27-32, 40.
- [22] 李正绪, 王仁, 邓长俊, 等. 500 kV 变压器高压出线装置电场分析及校核[J]. 广东电力, 2021, 34(2): 101-107.
LI Zhengxu, WANG Ren, DENG Changjun, et al. Electric field analysis and verification of 500 kV transformer high voltage outlet device[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(2): 101-107.
- [23] LIU J, ZHANG Z M, JIA B Y, et al. Corona characteristics of a large-sized AC grading ring and prediction of corona onset field intensity[J]. Energies, 2022, 15(6): 2041.
- [24] HUO F, ZHANG P, YU Y L, et al. Electric field calculation and grading ring design for 750 kV four-circuits transmission line on the same tower with six cross-arms[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 3155-3159.
- [25] 陈迪, 苏春强, 安海舰, 等. 淋雨条件下 220 kV 绝缘子均压环电晕放电特性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 170-176.
CHEN Di, SU Chunqiang, AN Haijian, et al. Research on corona discharge characteristics of grading ring of 220 kV insulator under rainfall condition [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 170-176.
- [26] 刘春雨. 均压环与球电极风沙侵蚀及表面特征的起晕电压研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
LIU Chunyu. Study on corona onset voltage of sand erosion and surface characteristics of equalizing ring and ball electrode [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [27] 杨军鹏, 安小宁. 基于 COMSOL Multiphysics 的静电场仿真分析[J]. 物理通报, 2020(1): 99-100, 103.
YANG Junpeng, AN Xiaoning. Simulation analysis of electrostatic field based on COMSOL Multiphysics[J]. Physics Bulletin, 2020(1): 99-100, 103.
- [28] AZIZ E, AOUABED F, ABDELLAH H, et al. Case study: optimizing grading ring design for high voltage polymeric insulators in power transmission systems for enhanced electric field and voltage distribution by using a finite element method[J]. Energies, 2023, 16(13): 5235.
- [29] 侯纪勇, 徐志军, 程政, 等. 高海拔高电压等级调相机升压变压器套管的防雨闪措施[J]. 浙江电力, 2023, 42(4): 88-94.
HOU Jiyong, XU Zhijun, CHENG Zheng, et al. A study on rain flashover protection measures for bushings of high voltage class stepup transformer with synchronous condenser at high altitudes[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(4): 88-94.

- [30] 刘水平. 互感器电力电容器[M]. 北京:中国电力出版社,2020.
LIU Shuiping. Transformer power capacitor[M]. Beijing: China Electric Power Press,2020.
- [31] 严伟,郑毅,张广泰,等. 特高压换流站可控消能装置均压环优化设计[J]. 电瓷避雷器,2023(4):205-212.
YAN Wei, ZHENG Yi, ZHANG Guangtai, et al. Optimization for grading rings of UHVDC controllable energy absorption device[J]. Insulators and Surge Arresters,2023(4):205-212.

作者简介:



廖文龙

廖文龙(1989),男,硕士,工程师,从事变压器多物理场仿真及故障诊断技术工作(E-mail:1037194862@qq.com);

丁理杰(1981),男,博士,教授级高级工程师,从事电力设备在线监测工作;

朱天宇(1976),男,学士,高级工程师,从事变压器、GIS等设备试验工作。

Design of grading ring structure for high altitude ultra-high voltage transformers

LIAO Wenlong¹, DING Lijie¹, ZHU Tianyu¹, HUANG Zhiwen², ZHANG Yu¹, WEI Wenfu²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company Research Institute, Chengdu 610041, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Before putting into operation, ultra-high voltage transformers need to undergo strict handover tests to ensure their safe and reliable operation. The grading capacity of the grading ring on the transformer will affect the accuracy of the handover test. When there are problems with high altitude environments or grading ring structures, their grading ability will change. It is particularly important to study and design grading rings that can have good grading ability in different situations. This article first uses COMSOL software to build a three-dimensional model of the withstand voltage test circuit of a 500 kV transformer. Secondly, the influence of changes in the pipe diameter and ring spacing of the equalizing ring on the equalizing capacity of the equalizing ring is studied. Finally, the variation of equalizing capacity of the equalizing ring in a rough state is studied. It is found that as the diameter of the equalizing pipe and the ring diameter increase or the distance between the rings decreases, the equalizing ability of the equalizing ring will be enhanced, with the greatest impact brought by the change in pipe diameter. When the grading ring has a rough surface, its grading ability will significantly decrease. Among them, the grading ability decreases most significantly when adhering to conical particles, and decreases least when concave, indicating that the smoother the surface of the grading ring, the better the grading ability. This study can provide some assistance for the design of grading rings for high altitude ultra-high voltage transformers.

Keywords: high altitude; transformer; grading ring; electric field distribution; corona discharge; roughness problem

(编辑 李栋)