

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.04.024

接地变抗出口短路能力分析及其提升

李嘉洋¹, 咸日常¹, 李飞², 胡玉耀¹, 薛永端³, 王伟¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000;

3. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要:针对目前接地变出口短路工况下绕组物理特征研究不足、损坏事故多等问题,文中以一台干式接地变为研究对象,利用有限元仿真软件搭建三维多物理场耦合模型,分析研究接地变低压侧出口短路工况下绕组电磁、温升、应力形变等多物理参量的变化及分布规律,探究影响接地变抗出口短路能力的关键因素。结果表明:接地变发生出口短路后,受其轭铁心及邻柱铁心的影响,绕组侧面磁通及其等效应力均大于绕组正面,整体形变极不均匀;受接地变特殊的绕组结构和工作方式的影响,其低压绕组在出口短路故障时的暂态温度可达140.9℃,远高于高压绕组。最后基于动、热稳定的双重约束,提出接地变抗出口短路能力的提升措施,对接地变抗出口短路能力的薄弱部位进行结构优化。

关键词:接地变;出口短路;多物理场耦合;绕组形变;绕组温升;抗短路能力提升

中图分类号:TM41

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)04-0226-09

0 引言

随着我国中压配电网的不断发展,接地变这一特种变压器在我国大、中型变电站中得到广泛应用^[1-4]。接地变一方面作为中压不接地系统构建经消弧线圈或小电阻接地的中性点,来抑制系统因单相接地故障而产生的故障电弧;另一方面,兼作站用变压器,为变电站设备提供可靠电能^[5-8]。由此可见,接地变是否安全可靠直接关系到变电站的运行安全。由于接地变独特的工作方式和绕组结构,其一、二次绕组容量相差较大,短路阻抗小于常规配电变压器,一旦其低压侧发生出口短路故障,短路电流远大于普通配电变压器,更易对绕组绝缘产生破坏^[9-10]。因出口短路累积效应造成接地变绕组匝间短路、设备烧毁的案例时有发生^[11-13]。

由于在实际试验研究中设置接地变短路故障易对其绝缘产生不可逆的损害,且相关暂态物理量难以有效测量,因此国内外专家学者多利用数值模拟软件建立接地变等效模型,对其不同故障工况下的绕组暂态特征展开研究。文献[14]利用ANSYS软件建立了接地变的二维电磁模型,分析了接地变低压侧发生匝间短路后的电磁特征;文献[15-17]利用PSCAD软件建立含接地变的配电系统电磁暂态模型,分析了系统单相接地运行时接地变运行特性及负载损耗变化;文献[18]建立了接地变等效电路

模型,并对接地变正常运行和外部短路故障工况展开分析;文献[19]建立了接地变三维电磁模型,分析了系统单相接地故障时绕组磁场分布规律,并计算了接地变零序阻抗;文献[20]建立了含接地变的低压配电网模型,分析了系统单相接地故障时接地变高压绕组电压、电流变化规律。综上所述,目前关于接地变故障工况下的绕组暂态特征研究大多只考虑电磁特征,其依托的模型也多为电磁模型,难以对接地变发生出口短路时的空间漏磁场、绕组温度变化及受力形变情况进行有效分析,关于接地变出口短路工况下绕组物理特征的研究存在不足。因此,有必要深入研究接地变发生出口短路后的绕组物理参量变化特征,分析影响接地变抗出口短路能力的关键因素,探究接地变抗出口短路能力的薄弱部位,为接地变绕组的结构优化及相关保护配置提供参考。

对此,文中以一台干式接地变为研究对象,利用有限元仿真软件搭建接地变三维多物理场耦合模型,通过对耦合模型设置出口短路故障来模拟真实情况,利用仿真得到的稳态短路电流数据对模型的有效性进行验证。在此基础上,分析接地变出口短路工况下绕组电磁、温升、应力形变等多物理参量的变化及分布规律。文中探究接地变抗出口短路能力的薄弱部位,通过增设硬纸筒和撑条的方式对绕组结构进行优化,利用多物理场耦合模型探究撑条数目对绕组动、热稳定性的影响规律,并依据实际经验及变压器状态评价导则对优化后的绕组

收稿日期:2024-01-11;修回日期:2024-03-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077221)

进行评价,进而确定最优结构形式。

1 多物理场模型的建立

1.1 接地变的结构形式

我国接地变多采用 ZNyn11 型的接线方式,其等效电路如图 1 所示。图 1 中, u_A 、 u_B 、 u_C 为接地变高压侧三相电压; i_A 、 i_B 、 i_C 为接地变高压侧三相电流; i_a 、 i_b 、 i_c 为低压侧三相电流; i_L 为流经消弧线圈的电感电流; R_1 、 R_2 、 R_3 和 L_1 、 L_2 、 L_3 分别为高压主绕组的电阻和电感; R_4 、 R_5 、 R_6 和 L_4 、 L_5 、 L_6 分别为高压移相绕组的电阻和电感; R_7 、 R_8 、 R_9 和 L_7 、 L_8 、 L_9 分别为低压绕组的电阻和电感; Z_a 、 Z_b 、 Z_c 为接地变二次侧所接的站用负载阻抗。

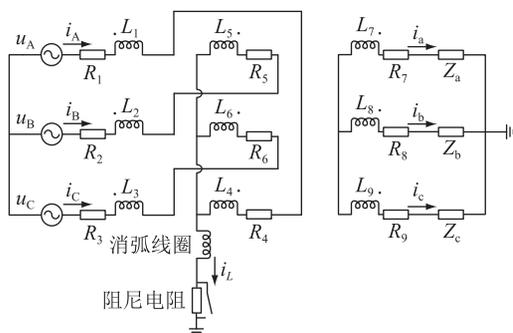


图 1 接地变等效电路

Fig.1 Grounding transformer equivalent circuit

依据图 1 所示接地变等效电路绘制出接地变的二维模型示意图,如图 2 所示。

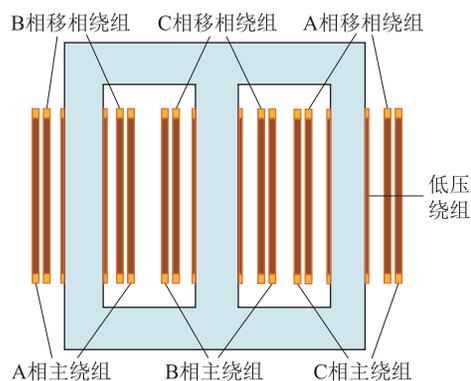


图 2 接地变模型示意

Fig.2 Schematic diagram of grounding transformer model

由图 1 和图 2 可知,接地变低压绕组靠近铁心,采用 Y 型接线方式;高压绕组位于低压绕组外侧,采用 Z 型接线方式,其每相绕组分成主绕组和移相绕组两部分,反向套装在不同的铁心柱上,二者形成中性点经消弧线圈接地。与普通配电变压器相比,ZNyn11 型接地变具有零序阻抗低,一、二次侧容量相差较大,阻抗电压低等特点。

1.2 仿真模型的建立

1.2.1 模型简化

为了探究接地变抗出口短路能力及提升措施,文中以一台型号为 DKSC-650/38.5-100/0.4 的干式接地变为研究对象,其主要技术参数如表 1 所示。由于接地变特殊的绕组结构及工作方式,常规二维轴对称仿真模型难以准确反映接地变发生出口短路后各项物理特征变化,对此文中选择建立准确性较高的三维仿真模型对接地变发生出口短路后的绕组各项物理特征进行分析。

表 1 接地变主要技术参数

Table 1 Grounding transformer main technical parameters

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|----------------|-------|-------------|---------|
| 高压侧额定容量/(kV·A) | 650 | 低压绕组直径/mm | 225~239 |
| 低压侧额定容量/(kV·A) | 100 | 联结组别 | ZNyn11 |
| 高压侧额定电压/kV | 38.5 | 高压绕组匝数 | 2×1 050 |
| 低压侧额定电压/kV | 0.4 | 低压绕组匝数 | 18 |
| 高压侧额定电流/A | 9.7 | 高压主绕组直径/mm | 556~588 |
| 低压侧额定电流/A | 144.3 | 高压绕组高度/mm | 820 |
| 铁心直径/mm | 220 | 低压绕组高度/mm | 820 |
| 铁轭高度/mm | 220 | 高压移相绕组直径/mm | 432~464 |
| 铁心窗高/mm | 1 210 | | |

基于表 1 参数在 SolidWorks 软件中绘制接地变三维几何模型。在保证精度的前提下,为了使仿真计算更易收敛,模型建立时忽略对仿真结果影响较小的铁心夹件、匝间绝缘等结构,只考虑接地变铁心和绕组以及对温度影响较大的绝缘筒;同时为了获取接地变短路后的机械特性,保留绕组端部的绝缘垫块。简化后的三维仿真模型如图 3 所示。

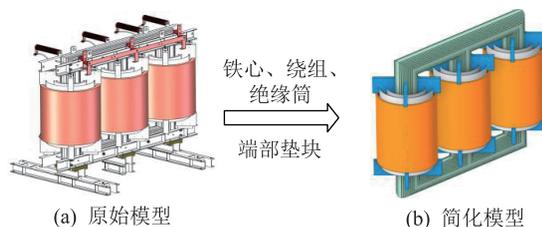


图 3 接地变三维简化模型

Fig.3 Grounding transformer three-dimensional simplified model

将建立好的模型导入到 ANSYS Workbench 协同仿真平台,依据接地变实际运行特点建立接地变电磁-结构和电磁-温度多物理场仿真模型。接地变的铁心材料采用 30Q120 型号硅钢片,绕组的材料设置为铜导体,绝缘筒为环氧玻璃纤维,端部垫块为硅树脂垫块。

1.2.2 仿真模型设置

在电磁场仿真过程中,对绕组施加环形电流激励,接地变外侧施加磁力线平行边界条件;在机械场中对绕组端部垫块施加全位移约束条件并向内施加轴向预紧力,各个接触面的接触条件设置为绑定接触,即假设端部垫块不发生位移,其他部件与端部垫块之间刚性连接。

在温度场仿真过程中,考虑到干式接地变绕组结构相对复杂,气道较多,为了更好地反映气流换热对绕组温度的影响,文中建立了接地变流-固-热耦合模型,对接地变出口短路后绕组的温度变化过程展开分析。接地变铁心和低压绕组辐射换热量较小,可以忽略,因此只考虑对流换热和热传导,在边界条件上选择耦合边界条件;而高压绕组辐射换热量较大,因此在边界条件上增设辐射边界条件。设置空气为流体,流体模型选择层流模型。

1.2.3 多物理场仿真流程

接地变多物理场仿真计算时按照顺序耦合法,对接地变发生出口短路后的绕组暂态物理特征展开分析。首先在电磁场模块中设置在接地变出口短路中危害最大的三相出口短路,通过仿真得到接地变的电磁参数变化规律;其次将电磁场模块中绕组所受电磁力密度作为载荷耦合到结构场模块中,得到绕组的受力形变情况;最后将电磁场模块中得到的绕组和铁心的有功损耗作为热载荷耦合到温度场模块中,得到故障后绕组温度分布规律。仿真流程如图4所示。

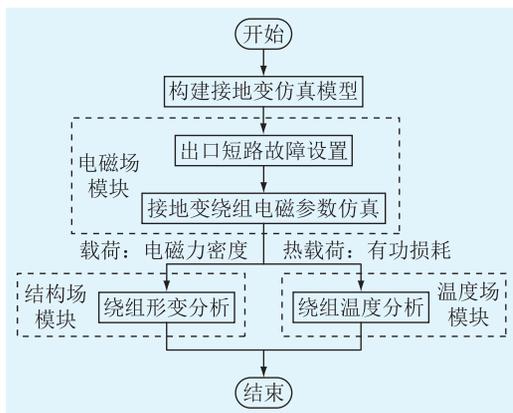


图4 多物理场仿真流程

Fig.4 Flow chart of multi-physics field simulation

2 接地变抗短路能力分析

2.1 短路电流仿真及验证

在三维电磁场模块中设置接地变三相出口短路工况,仿真得到高压绕组和低压绕组短路电流。为了验证仿真模型的准确性,根据《电力变压器第5

部分:承受短路的能力》(GB 1094.5—2008)计算接地变三相短路后的稳态电流,将计算后的数值与仿真值进行对比,如表2所示。

表2 高、低压绕组短路电流计算值与仿真值对比

Table 2 Comparison between calculated and simulated short-circuit currents of high and low voltage windings

| 短路电流 | 计算值/A | 仿真值/A | 误差/% | |
|------|-------|----------|----------|-----|
| 高压绕组 | A相电流 | 94.79 | 98.04 | 3.3 |
| | B相电流 | 94.79 | 98.70 | 4.0 |
| | C相电流 | 94.79 | 99.14 | 4.4 |
| 低压绕组 | A相电流 | 9 230.43 | 9 661.72 | 4.5 |
| | B相电流 | 9 230.43 | 9 570.50 | 3.6 |
| | C相电流 | 9 230.43 | 9 614.54 | 4.0 |

由表2可知,高、低压绕组短路稳态电流计算值与仿真值最大误差为4.5%,最小值为3.3%,理论计算值与仿真值基本吻合,验证了模型准确性。

2.2 绕组漏磁场分析

考虑到接地变三相出口短路为对称性短路,其三相短路电流基本一致,可以选择其中一相绕组为例对绕组漏磁场及受力形变情况进行分析。文中以B相绕组为例进行分析。为了提取绕组漏磁场分布情况,按照图5在B相绕组不同位置处设置仿真路径,设定绕组位于铁心窗外部的部分为正面,取路径1—3,绕组位于铁心窗内部的部分为绕组侧面,取路径4—6。

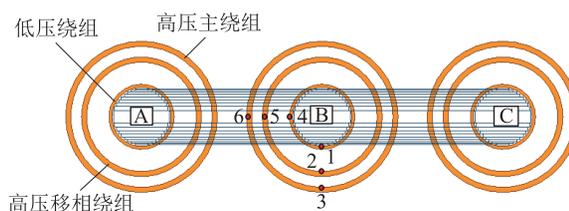


图5 仿真路径

Fig.5 Simulation paths

在接地变发生出口短路情况下,B相绕组流过最大短路电流时,绕组漏磁场分布情况如图6所示。

由图6(a)可知,接地变发生出口短路后,路径1—3与其同绕组的路径4—6上轴向磁密分布趋势及数值大小基本相同,证明绕组沿圆周方向上的轴向漏磁场分布均匀。而由图6(b)可知,路径4—6辐向磁密远大于路径1—3,路径1—3上的辐向磁密趋近于0,证明绕组沿圆周方向上的辐向漏磁场分布不均,绕组位于铁心窗内部的辐向磁密要大于铁心窗外部。这是因为接地变在实际运行过程中,受轭铁心及邻柱铁心的影响,绕组沿圆周方向上的漏磁场分布并不均匀,绕组位于铁心窗内部的漏磁场要大于铁心窗外部的漏磁场^[21-22]。

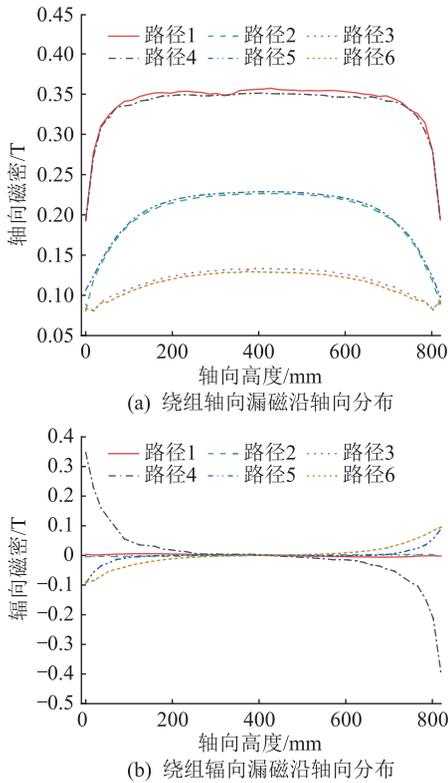


图6 高、低压绕组漏磁场分布

Fig.6 Leakage field distribution of high and low voltage windings

进一步分析绕组漏磁场沿绕组轴向分布情况,从图6(a)中可以看出,接地变发生出口短路后,3个绕组的轴向漏磁分布趋势基本相同,从数值上来看,低压绕组轴向磁密高于高压移相绕组和主绕组的轴向磁密;从分布趋势来看,3个绕组的轴向漏磁最大处均位于绕组的中部,越靠近端部绕组轴向漏磁越小。而从图6(b)中可以看出,接地变低压绕组的辐向漏磁高于高压移相绕组和主绕组,并且同一时刻低压绕组和高压绕组的辐向漏磁方向相反;3个绕组的辐向漏磁分布均沿绕组中部高度对称,最大辐向漏磁位于绕组端部。

2.3 绕组受力及形变分析

在工程上变压器动稳定性校验中的试验电流选取最大短路电流,即变压器发生短路0.01 s后的短路电流,此时绕组受到的短路电磁力最大。因此文中将接地变发生三相出口短路后0.01 s时刻的绕组电磁力密度作为激励,耦合到结构场模块,仿真得到绕组的等效应力分布曲线,如图7所示。

由图7可知,接地变出口短路情况下高压移相绕组和主绕组的正面和侧面等效应力分布趋势基本相同,最大等效应力均出现在绕组的中部,并逐渐向两侧递减。而低压绕组所处位置更加靠近铁心,绕组所受等效应力要大于高压移相绕组和高压

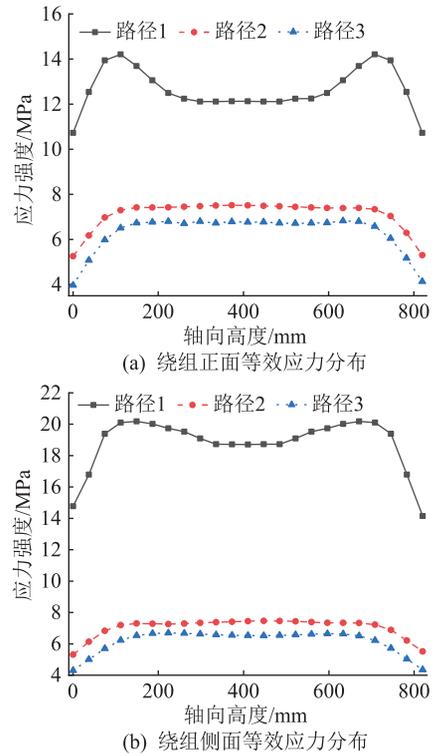


图7 高、低压绕组等效应力分布

Fig.7 Equivalent force distribution of high and low voltage windings

主绕组。并且受上下轭铁心及邻柱铁心的影响,低压绕组上下端部所受的等效应力要大于绕组中部,绕组侧面所受的等效应力要大于绕组正面,这与低压绕组表面漏磁场分布规律相同。因此在接地变出口短路情况下,低压绕组受短路电磁力影响的复杂程度和危害要远高于高压绕组,其受力形变云图如图8所示。

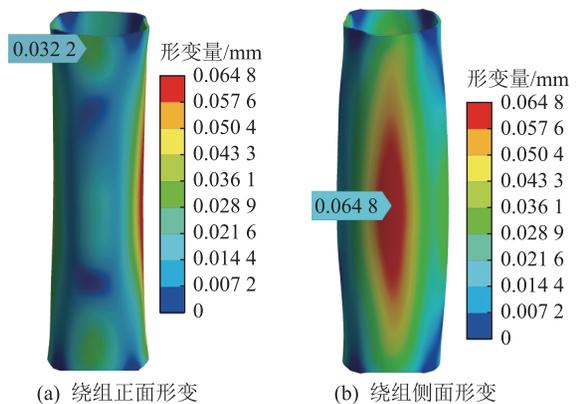


图8 低压绕组受力形变

Fig.8 Low voltage winding force deformation

由图8可知,低压绕组整体呈“向内凹陷”的趋势且形变极不均匀,绕组侧面形变量最大处位于绕组中部,约为0.0648 mm,而绕组正面形变量最大处位于绕组端部,约为0.0322 mm,绕组侧面形变量要远高于绕组正面形变量。

通过对绕组应力及形变的分析不难得出,接地变低压绕组整体受力形变并不均匀,绕组各个线匝不仅在圆周方向上形变不对称,在轴向上受力也不均匀。在这种情况下低压绕组存在辐向失稳的风险,容易引起绕组匝间绝缘破坏,促使接地变发生内部故障,导致设备损坏。因此要提高绕组整体机械强度,需要着重提高低压绕组的辐向稳定性。

2.4 绕组温度分析

接地变实际运行中通常配有熔断器保护,出口短路故障一般持续数十毫秒,温度变化幅度不大。《电力变压器第5部分:承受短路的能力》(GB 1094.5—2008)中规定:考核绕组短路耐热能力时,出口短路持续时间取2 s,环境温度为22℃。为了更好地展现绕组因出口短路造成的温度暂态变化,将接地变额定运行工况下的温度设置为初始温度,以B相绕组为例,获取出口短路后接地变绕组的温度分布云图和绕组温升曲线,分别如图9和图10所示。

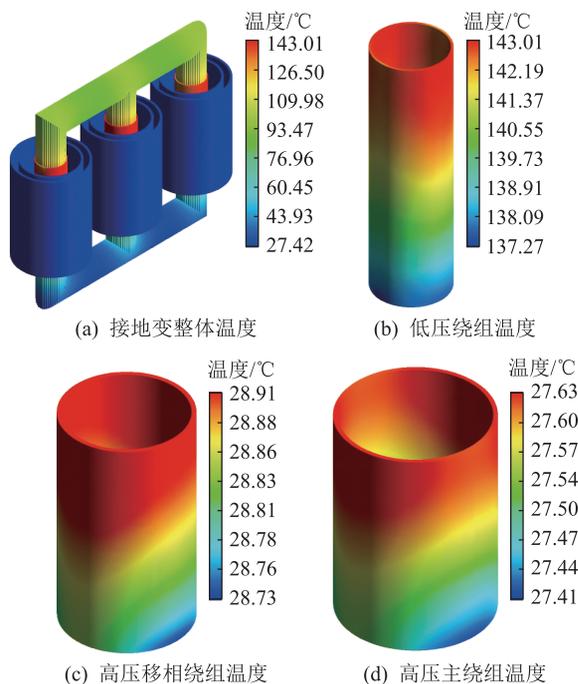


图9 短路后绕组温度分布云图

Fig.9 Windings temperature distribution cloud diagram after short-circuit

从温度分布规律来看,出口短路后接地变高、低压绕组的温度分布趋势相同。由图9可知,温度最高值均位于绕组上端部,越靠近绕组底部温度越低。从数值上来看,低压绕组的温度远远高于高压移相绕组和主绕组,由图10可知,额定负载时,低压绕组的平均温度为81.2℃,而高压移相绕组和主绕组的平均温度则分别为26.6℃和25.3℃,高、低压绕组的温度差最大可达55.9℃;而发生出口短路

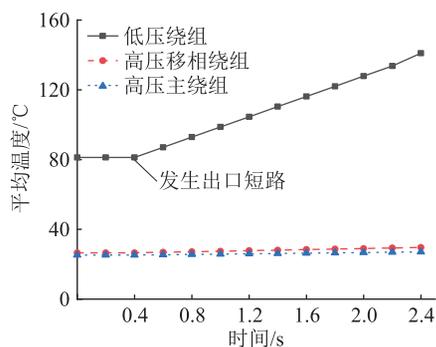


图10 绕组温升曲线

Fig.10 Windings temperature rise curves

后,低压绕组温度急剧上升,故障发生2 s后平均温度就达到了140.9℃,高压移相绕组和主绕组短路温度增长缓慢,平均温度分别为28.8℃和27.5℃,2 s内温度涨幅均不超过3℃,高、低压绕组温度差进一步扩大,最大可达113.4℃。

不难看出,接地变高、低压绕组温度相差极大,其原因在于接地变特殊的绕组结构。接地变高压绕组由移相绕组和主绕组两部分组成,高压绕组额定容量为消弧线圈容量和低压绕组容量之和,其容量大于低压绕组。接地变正常运行时,消弧线圈不工作,接地变仅承担站用负荷,该情况下高压绕组电流远低于额定电流,作为热载荷的损耗密度远低于低压绕组,因此高压绕组的温度远低于低压绕组,二者温差极大。而发生出口短路后,虽然高压移相绕组和主绕组的损耗密度激增,但是依旧远远低于低压绕组,短时间内高压移相绕组和主绕组的温升相较于低压绕组并不明显。而普通配电变压器高、低压绕组容量相同,在正常运行及三相出口短路工况下,高、低压绕组间的温度差远小于接地变高、低压绕组间的温度差,接地变出口短路时的温度分布情况和普通配电变压器有很大差别^[23-24]。

综上所述,接地变出口短路故障后高压绕组温升远低于低压绕组,因此相比于高压绕组,接地变出口短路更考验低压绕组的耐热能力,应着重提高低压绕组的散热性能以提高接地变的热稳定性。

3 接地变抗短路能力提升措施

由上文分析可知,接地变由于其特殊的绕组结构,高压绕组容量远大于低压绕组,一旦低压侧发生出口短路,低压绕组所受到的短路电磁力更大,并且温度更高。因此要提高接地变绕组抗短路能力,提升绕组承受短路的动、热稳定性能,需要围绕低压绕组展开研究。

对于如何提高绕组承受短路的动稳定性,业界

已经有比较成熟的制造工艺,目前最常用的方式是增加撑条数目并采用硬纸筒作为绕组骨架^[25]。文中拟采用以上工艺措施来对低压绕组进行优化。

低压绕组内侧选择硬纸筒做骨架,硬纸筒套装在铁心柱上,铁心与纸筒之间接触面要尽可能的大。同时,为了提高低压绕组热稳定性,纸筒和低压绕组之间需要预留气道,气道内均匀安装撑条作为纸筒和低压绕组之间的支撑,撑条材质选择常用的玻璃纤维。优化后的低压绕组结构示意图见图 11。

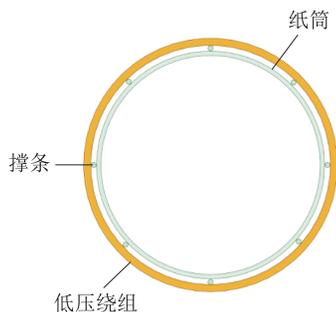


图 11 优化后的低压绕组结构

Fig.11 Optimized low voltage winding structure

对于高压侧为 35 kV 电压等级的接地变,其低压侧气道常取 6 mm,按照撑条间距不大于 120 mm 来计算撑条数目^[26]。但按照上述撑条间距计算出来的撑条数目并非最优解,撑条数目的改变对于绕组承受短路的动、热稳定性能有很大的影响。因此,文中选择撑条数目作为优化变量,在低压绕组和纸筒之间分别均匀安装 4~24 根撑条,分析不同撑条数目对低压绕组动、热稳定性的影响,如图 12 和图 13 所示。

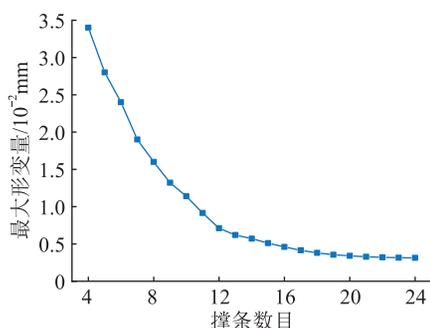


图 12 绕组最大形变量与撑条数目的关系

Fig.12 The relationship between the maximum shape variable of windings and the number of struts

图 12 为接地变出口短路故障工况下不同数目撑条与绕组最大形变量的关系。对比图 8 和图 12 可知,当撑条数目小于 12 根时,增加撑条数目可以明显减小低压绕组的最大形变量;但当撑条数目大于 12 根时,增加撑条数目对增强低压绕组的承力能力的作用明显减小。

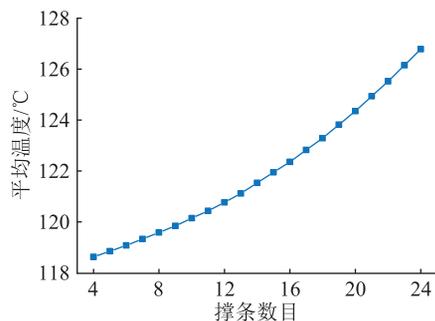


图 13 绕组平均温度与撑条数目的关系

Fig.13 The relationship between average temperature of winding and the number of struts

图 13 为接地变出口短路故障工况下不同数目撑条与绕组平均温度的关系。对比图 9 和图 13 可知,受增加气道的影响,优化后的低压绕组散热性能明显提高。但从图 13 中可以看出,在发生出口短路 2 s 后,安装 4 根撑条时,低压绕组平均温度为 118.6 ℃,而安装 24 根撑条时,低压绕组平均温度为 126.8 ℃,增加了 8.2 ℃。随着撑条数目增加,发生短路故障后低压绕组的平均温度升高,这是因为撑条数目增加使得低压绕组的有效散热面积减小,散热性能随之降低。因此增加撑条数目不利于低压绕组的短路耐热能力。

由上述研究可知,增加撑条数目有利于提高绕组的承力能力,但不利于绕组的短路耐热能力,因此需要综合考量二者的变化情况选择最优撑条数目。可以通过对不同撑条数目下绕组优化效果进行评价,进而确定最优撑条数目。为了量化绕组动、热稳定性能的优化效果,评价指标选择绕组承受短路的动、热稳定性能变化率,计算式为:

$$\begin{cases} x_n = \frac{x_0 - x}{x_0} \\ w_n = \frac{w_0 - w}{w_0} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_n 、 w_n 分别为撑条数目为 n 时绕组承受短路的动、热稳定性能变化率; x_0 、 w_0 分别为未优化时绕组形变量和绕组温度; x 、 w 分别为优化后绕组形变量和绕组温度。

同时,为消除 x_n 和 w_n 的量纲大小和数据差异,利用式(2)对二者进行归一化处理。

$$\begin{cases} x_b = \frac{x_n - x_{n\min}}{x_{n\max} - x_{n\min}} \\ w_b = \frac{w_n - w_{n\min}}{w_{n\max} - w_{n\min}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_b 、 w_b 分别为归一化后绕组承受短路的动、热稳定性能变化率; $x_{n\max}$ 、 $w_{n\max}$ 和 $x_{n\min}$ 、 $w_{n\min}$ 分别为撑

条数目为 n 时绕组承受短路的动、热稳定性能变化率的最大值和最小值。

依据实际经验和变压器状态评价导则对其优化结果进行打分^[27]。打分计算式为：

$$y_n = (k_x x_b + k_w w_b) \times 100 \quad (3)$$

式中： y_n 为绕组优化分数； k_x 、 k_w 分别为绕组承受短路的动、热稳定性能的评价权重。

其中：

$$\begin{cases} k_x = \frac{a_x}{a_x + a_w} \\ k_w = \frac{a_w}{a_x + a_w} \end{cases} \quad (4)$$

式中： a_x 为绕组形变因素的影响因子，依据变压器状态评价导则取 6； a_w 为绕组温度因素的影响因子，依据变压器状态评价导则取 3。

利用式(1)—式(4)计算不同撑条数目下绕组结构的优化效果，如图 14 所示。由图 14 可知，当撑条数目为 12 根时，优化效果最佳，其绕组形变和温度情况如图 15 所示。

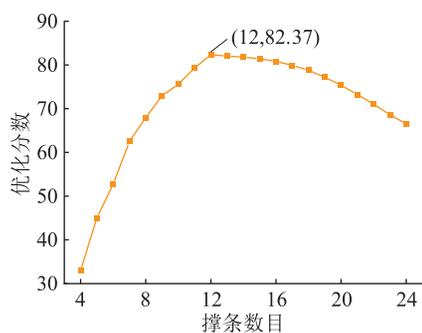


图 14 不同撑条数目下绕组结构优化效果

Fig.14 Optimization effect of winding structure under different number of struts

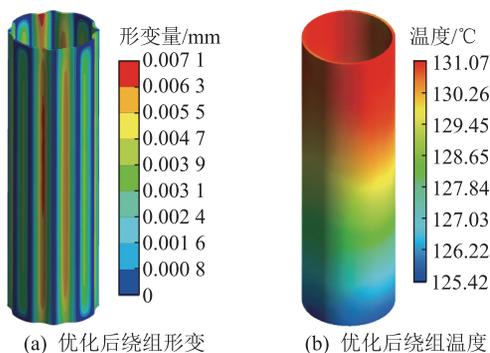


图 15 绕组优化情况

Fig.15 Windings optimization situation

由图 15 可知，优化后的绕组最大形变量为 0.007 1 mm，仅为优化前绕组最大形变量的 11.0%，沿圆周方向低压绕组的形变更加均匀，大幅度提高了绕组的辐向稳定性。优化后绕组的温度分布规

律未发生改变，但其平均温度为 120.7 °C，相较于优化前下降了 20.2 °C，且其短路耐热能力一并得到了提升。

4 结论

文中以一台真型干式接地变为例，建立三维多物理场仿真模型，研究分析了接地变低压侧三相出口短路工况下绕组物理参量特征，探求接地变抗出口短路能力的薄弱部位并提出优化措施。研究结论如下：

(1) 接地变发生出口短路后，绕组侧面磁通及其等效力均大于绕组正面，整体形变极不均匀；低压绕组受短路电磁力的影响大于高压绕组，整体存在辐向失稳风险。接地变绕组温度普遍升高，但由于高压绕组额定容量远大于低压绕组，其出口短路后的温升远小于低压绕组。

(2) 基于接地变绕组-撑条-硬纸筒的绕组结构优化形式，考虑动、热稳定的双重约束条件进行研究，当接地变的撑条数目为 12 根时，绕组形变和温度控制的优化效果最佳，接地变抗出口短路能力得到显著提升。

文中目前侧重于仿真研究，着重于从设计分析角度探求接地变抗出口短路能力，后期将在实际接地变展开试验，验证该措施的提升效果。

参考文献：

[1] 曾祥君,王沾,喻锟,等. 相电源馈入中性点的配电网接地故障相主动降压消弧装置及其应用[J]. 高电压技术,2022,48(9):3356-3366.

ZENG Xiangjun,WANG Zhan,YU Kun,et al. Arc suppression device for actively reducing grounding fault phase voltage based on phase power supply feedback in distribution network and its application[J]. High Voltage Engineering,2022,48(9):3356-3366.

[2] 曲文浩,秦海停. 经电阻接地系统风电场接地变压器保护的整定[J]. 电工技术,2023(2):158-161.

QU Wenhao,QIN Haiting. Setting of grounding transformer protection in wind farm resistance grounding system[J]. Electric Engineering,2023(2):158-161.

[3] 曾祥君,卓超,喻锟,等. 基于接地变压器绕组分档调压干预的配电网主动降压消弧与保护新方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(5):1523-1534.

ZENG Xiangjun,ZHUO Chao,YU Kun,et al. A novel method of faults arc extinguishing and feeder protection based on voltage regulating intervention with grounding transformer winding taps for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(5):1523-1534.

[4] 吴丽芳,白浩,欧阳健娜,等. 基于接地变压器绕组分级调节的配电网对地电容精确测量方法[J]. 电力科学与技术学

- 报,2022,37(5):109-114.
- WU Lifang, BAI Hao, OUYANG Jianna, et al. Accurate measurement method of distribution network-to-ground capacitance based on graded adjustment of grounding transformer windings [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(5):109-114.
- [5] 唐映媚. 浅析接地变的作用及保护的配置[J]. *科学技术创新*, 2020(17):152-153.
- TANG Yingmei. Analysis on the function of grounding transformer and the configuration of protection[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2020(17):152-153.
- [6] VOSOUGHI N, HOSSEINI S H, SABAH M. Single-phase common-grounded transformer-less grid-tied inverter for PV application[J]. *IET Power Electronics*, 2020, 13(1):157-167.
- [7] 董凯达, 钱建国, 马伟. 基于自主芯片的接地变压器接地故障检测方法研究[J]. *供用电*, 2022, 39(11):40-46.
- DONG Kaida, QIAN Jianguo, MA Wei. Research on detection method of grounding fault for grounding transformer based on domestic independent chips [J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(11):40-46.
- [8] 曾祥君, 李理, 喻锟, 等. 配电网相电源馈入中性点的接地故障相主动降压消弧新原理[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(8):2953-2966.
- ZENG Xiangjun, LI Li, YU Kun, et al. Novel principle of arc suppression for grounding phase voltage actively reduced based on phase power supply feedback in distribution network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(8):2953-2966.
- [9] 苏展, 于绍峰, 王洋. Z型联结组别接地变低压核相异常分析[J]. *变压器*, 2021, 58(10):30-33.
- SU Zhan, YU Shaofeng, WANG Yang. Analysis of abnormal low-voltage phase check situation of Z-type grounding transformer [J]. *Transformer*, 2021, 58(10):30-33.
- [10] 陈蕾. 接地变压器运行状态检测技术研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2022.
- CHEN Lei. Research on operation state detection technology of grounding transformer[D]. Zibo:Shandong University of Technology, 2022.
- [11] 王国亮, 吕乐, 胡伟, 等. 干式接地变压器的故障分析[J]. *电气开关*, 2021, 59(2):84-86.
- WANG Guoliang, LV Le, HU Wei, et al. Fault analysis of dry earthing transformer [J]. *Electric Switchgear*, 2021, 59(2):84-86.
- [12] 张冰倩, 咸日常, 于洋, 等. 匝间短路故障下电力变压器绕组的物理特征分析[J]. *高电压技术*, 2021, 47(6):2177-2185.
- ZHANG Bingqian, XIAN Richang, YU Yang, et al. Analysis of physical characteristics of power transformer windings under inter-turn short circuit fault [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(6):2177-2185.
- [13] 李继攀, 刘宏领, 郭奇军, 等. 基于功率因数角的接地变压器匝间短路故障辨识[J]. *供用电*, 2023, 40(9):50-57.
- LI Jipan, LIU Hongling, GUO Qijun, et al. Identification of inter turn short circuit fault of grounding transformer based on power factor angle [J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(9):50-57.
- [14] 咸日常, 陈蕾, 耿凯, 等. 接地变压器低压绕组匝间短路故障的电磁特征研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(8):74-82.
- XIAN Richang, CHEN Lei, GENG Kai, et al. Research on electromagnetic characteristics of short circuit faults in low-voltage windings of grounding transformers[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(8):74-82.
- [15] 陈蕾, 咸日常, 郑春旭, 等. 系统单相接地故障下接地变压器的运行特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(12):56-64.
- CHEN Lei, XIAN Richang, ZHENG Chunxu, et al. Analysis of the operational characteristics of a grounding transformer when there is a single-phase grounding fault of the system[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(12):56-64.
- [16] 咸日常, 陈蕾, 郑春旭, 等. 单相接地故障对接地变压器功率特性的影响分析[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(6):134-141.
- XIAN Richang, CHEN Lei, ZHENG Chunxu, et al. Analysis of the influence of single-phase grounding fault on the power characteristics of grounding transformer[J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(6):134-141.
- [17] 陈蕾, 咸日常, 李飞, 等. 系统单相接地故障对接地变压器负载损耗的影响[J]. *高电压技术*, 2021, 47(11):3941-3948.
- CHEN Lei, XIAN Richang, LI Fei, et al. Influence of system single-phase grounding fault on load loss of grounding transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(11):3941-3948.
- [18] 蒋仁江, 英云龙, 秦志成, 等. Z型接地变压器在PSCAD下的仿真模型构建[J]. *价值工程*, 2015, 34(29):137-138.
- JIANG Renjiang, YING Yunlong, QIN Zhicheng, et al. Simulation model of zigzag grounding transformer by PSCAD [J]. *Value Engineering*, 2015, 34(29):137-138.
- [19] 霍东起, 邹长宏, 韩冬杰, 等. ZN型联结的干式接地变压器零序阻抗分析[J]. *变压器*, 2023, 60(5):7-10.
- HUO Dongqi, ZOU Changhong, HAN Dongjie, et al. Analysis of zero-sequence impedance of ZN-connected dry-type grounding transformer[J]. *Transformer*, 2023, 60(5):7-10.
- [20] 费上贝. 系统单相接地故障下接地变压器的运行特性探讨[J]. *光源与照明*, 2022(8):111-113.
- FEI Shangbei. Discussion on operation characteristics of grounding transformer under single-phase grounding fault in system[J]. *Lamps & Lighting*, 2022(8):111-113.
- [21] 穆龙, 陈伯根, 蔡锋, 等. 电力变压器三维瞬态漏磁场及电动力仿真分析[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2021, 26(5):104-113.
- MU Long, CHEN Bogen, CAI Feng, et al. Simulation and analysis of 3D transient leakage magnetic field and electromotive force of power transformer[J]. *Journal of Harbin University of*

Science and Technology, 2021, 26(5):104-113.

[22] 杜国安,徐玉珍,兰生,等. 基于磁-结构场耦合的变压器绕组变形的因素分析[J]. 电气技术, 2021, 22(1):1-7,46.
DU Guoan, XU Yuzhen, LAN Sheng, et al. Factor analysis of transformer winding deformation based on magnetic-structure field coupling [J]. Electrical Engineering, 2021, 22(1):1-7,46.

[23] 张军,陈霄,张旺,等. 基于 GP-NLSM 的变压器绕组热点温度建模[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5):165-171.
ZHANG Jun, CHEN Xiao, ZHANG Wang, et al. Hot spot temperature prediction model of transformer based on GP-NLSM [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5):165-171.

[24] 张奇婧,王浩名,杜振斌,等. 干式变压器绕组三维温度场与温升的数值分析[J]. 变压器, 2021, 58(3):39-43.
ZHANG Qijing, WANG Haoming, DU Zhenbin, et al. Numerical analysis of three-dimensional temperature field and temperature rise for dry-type transformer winding [J]. Transformer, 2021, 58(3):39-43.

[25] 于少泽. 配电变压器抗短路能力分析及提升措施[D]. 淄博:山东理工大学, 2021.
YU Shaoze. Analysis of the short-circuit withstand capability of

distribution transformers and improvement measures [D]. Zibo:Shandong University of Technology, 2021.

[26] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2014.
XIE Yucheng. Power transformer manual [M]. 2nd ed. Beijing:China Machine Press, 2014.

[27] 国家能源局. 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则:Q/GDW 169—2008[S]. 北京:中国电力出版社, 2017.
National Energy Administration. Guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers (reactors): Q/GDW 169-2008[S]. Beijing:China Electric Power Press, 2017.

作者简介:



李嘉洋

李嘉洋(1999),男,硕士在读,研究方向为电气设备在线检测与故障诊断技术(E-mail:784218168@qq.com);

咸日常(1966),男,硕士,教授,博士生导师,研究方向为电气设备在线检测与故障诊断技术;

李飞(1988),男,博士,工程师,从事电力系统非线性动力学和高电压技术工作。

Analysis and improvement of grounding transformer's ability to resist outlet short-circuit

LI Jiayang¹, XIAN Richang¹, LI Fei², HU Yuyao¹, XUE Yongduan³, WANG Wei¹

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company Zibo Power Supply Company, Zibo 255000, China;

3. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Currently, there are issues such as insufficient research on the physical characteristics of windings in grounding transformers under outlet short circuit conditions and a high number of damage accidents. Given this issues, a dry-type grounding transformer is chosen as the research subject. A three-dimensional multi-physics field coupling model is constructed using finite element simulation software. The aim is to analyze changes and distribution patterns of multiple physical parameters such as winding electromagnetic fields, winding temperature rise, and winding stress deformation under the outlet short circuit condition of the low voltage side of the grounding transformer. The key factors influencing grounding transformer's ability to resist outlet short circuit are also explored. Results indicate that after an outlet short circuit occurs in the grounding transformer, the magnetic flux and equivalent stress on its winding side, influenced by its yoke core and adjacent pillar cores, are greater than those on the front side, resulting in extremely uneven overall deformation. Due to the grounding transformer's special winding structure and operating mode, the transient temperature of its low voltage winding during outlet short circuit faults can reach 140.9 °C, which is much higher than that of the high voltage winding. Finally, measures are proposed to improve the grounding transformer's ability to resist outlet short-circuit based on the dual constraints of dynamic and thermal stability, and structural optimization is carried out for the weak areas of grounding transformer to resist outlet short-circuit.

Keywords: grounding transformer; outlet short-circuit; multi-physics field coupling; winding deformation; winding temperature rise; improved short-circuit resistance

(编辑 陆海霞)