

系统单相接地对接地变压器绕组暂态特征的影响

咸日常¹, 李嘉洋², 赵如杰³, 吕东飞⁴, 邢雅雯¹, 张伟¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 淄博 255000; 2. 国网山东省电力公司德州供电公司, 德州 253000;
3. 山东汇能电气有限公司, 淄博 255000; 4. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 淄博 255000)

摘要: 系统单相接地会改变接地变压器绕组暂态特征, 影响其运行状态诊断和相关保护定值整定。由于接地变压器绕组暂态特征与所处配电网的整体运行工况密切相关, 难以通过单一仿真模型进行分析, 因此构建一种由配电网电磁暂态模型和接地变压器多物理场模型组成的多维仿真模型, 并以试验值、实际故障案例验证模型准确性, 通过数据耦合实现外部系统动态电力参数的输入, 研究系统单相接地运行前后接地变压器绕组物理特征的变化规律。结果表明: 系统单相接地运行时, 接地变压器低压绕组电流特性不变, 高压绕组电流最大值激增、电流相位差最大值下降, 漏磁场向外偏移并使相间漏磁增大; 高压绕组受力形变规律发生变化, 形变量稍有增大, 在多次单相接地故障冲击下绕组无明显变形, 累积效应较弱; 高压绕组温升明显增加, 同芯柱主绕组和移相绕组温差增大。

关键词: 接地变压器; 系统单相接地; 多维仿真模型; 温度; 累积形变

Influence of System Single-phase Grounding on Transient Characteristics of Grounding Transformer Windings

XIAN Richang¹, LI Jiayang², ZHAO Rujie³, LYU Dongfei⁴, XING Yawen¹, ZHANG Wei¹

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;
2. Dezhou Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Dezhou 253000, China;
3. Shandong Huineng Electric Co., Ltd., Zibo 255000, China;
4. Zibo Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zibo 255000, China)

Abstract: Single-phase grounding of a system will change the transient characteristics of the grounding transformer winding, and affect its operating state diagnosis and related protection setting. Since the transient characteristics of the grounding transformer winding are closely related to the overall operating conditions of the distribution network, it is difficult to perform analysis by a single simulation model. Therefore, a multidimensional simulation model composed of the electromagnetic transient model of the distribution network and the multi-physical field model of the grounding transformer is constructed, and the accuracy of the model is verified by test values and actual fault cases. The dynamic power parameters of external systems are input through data coupling, and the physical characteristics of grounding transformer winding before and after single-phase grounding operation are studied. The results show that, when the system is in single-phase grounding operation, the current characteristics of the low-voltage winding of the grounding transformer remain unchanged, the maximum current of the high-voltage winding is increased, the maximum current phase difference is decreased, and the leakage magnetic field shifts outwards and increases the interphase magnetic leakage. The stress deformation law of high voltage winding changes, and the shape variable increases slightly; under the impact of multiple single-phase grounding faults, the winding has no obvious deformation, and the cumulative effect is weak. The maximum temperature rise of the high voltage winding is increased, and the temperature difference between the main winding and phase-shift winding of the same core column is increased.

Key words: grounding transformer; system single-phase grounding; multi-dimensional simulation model; temperature; cumulative deformation

0 引言

近年来,随着我国中低压配电网的改造与建设,城市电网中电力电缆的比重不断增加,使得中性点非有效接地系统在单相接地运行时的对地电容电流激增,接地电弧不易自行熄灭,因此产生的弧光过电压极易导致电气设备绝缘损坏^[1-2]。对此,常采用经消弧线圈补偿方式抑制接地电弧,或采用中性点经小电阻接地方式,靠保护装置切除故障^[3-4]。但目前变电站主变压器低压侧绕组多为三角形联结,没有中性点引出,通常靠装设接地变压器来增设系统中性点^[5-6]。

接地变压器具备为中压不接地系统提供中性点^[7]和为变电站供电的双重功能,其运行工况有别于普通配电变压器。系统单相接地运行对接地变压器绕组暂态特征的影响较大,极易对接地变压器故障诊断结果和相关保护判据产生干扰,接地变压器故障时有发生^[8-9]。因此,有必要分析系统单相接地运行时接地变压器绕组的暂态特征,为接地变压器故障诊断及保护配置提供参考。

接地变压器的运行工况相对复杂^[10],在实际试验研究中设置相应故障成本高、难度大,一些特定物理量无法直接测量,对此学者们多利用仿真软件模拟接地变压器的运行过程,分析其暂态运行特征^[11]。鉴于接地变压器暂态特征受系统运行方式的影响大,学者们常利用电磁暂态仿真软件搭建含接地变压器的配电网电磁暂态模型,分析接地变压器电磁特征。文献[12]建立了接地变压器等效电路模型,分析接地变压器正常运行和外部短路故障;文献[13]利用 MATLAB 软件建立一种由多个单相变压器组成的接地变压器电路模型,分析内部故障时的电压、电流特征;文献[14-16]利用 PSCAD 软件分析系统单相接地运行对接地变压器运行参数的影响。

随着变压器状态检测技术的发展,诸如电磁^[17]、温度^[18-19]、受力形变等多物理参量成为敏感检测状态量,而电磁暂态模型仅能模拟接地变压器电气参量的变化,无法满足对多物理参量分析的需求。因此,学者们利用有限元软件^[20-21]建立接地变压器多物理场模型,对接地变压器运行过程中的多物理特征展开分析。文献[22]在 ANSYS 软件中搭建接地变压器电磁场仿真模型,对接地变压器运行过程中绕组所受电动力变化进行分析;文献[23]则建立接地变压器绕组匝间短路有限元模型,对其低压

绕组发生匝间短路时的电流、磁场等参数变化情况展开分析。受有限元模型计算规模限制,仿真建模过程中多会忽略配电系统的影响,难以准确分析接地变压器暂态特征的变化。

综上可知,电磁暂态模型可以反映配电系统对接地变压器运行故障特征的影响,但仅可以分析接地变压器电磁特征,无法满足基于多特征量状态检测的需求;有限元模型可以分析接地变压器运行及故障过程中的多物理特征变化,但在建模过程中忽略了配电系统的影响。因此,提出一种模拟配电系统动态变化且可以分析接地变压器电磁、温度、受力形变等多物理特征的仿真模型,对研究接地变压器绕组暂态特征及状态检测技术具有重要意义。

针对上述问题,本文以某变电站配电系统为例,建立由接地变压器外部配电网电磁暂态模型和接地变压器多物理场模型组成的多维仿真模型,通过模型间的数据耦合,反映系统参数变化对接地变压器绕组暂态特征的影响,并以试验值、实际故障案例验证模型准确性,在此基础上,分析系统单相接地运行对接地变压器绕组电流、磁场、受力形变、温度等暂态特征的影响,为接地变压器绕组运行状态检测及相关保护定值整定提供理论依据。

1 多维仿真模型的建立及验证

1.1 接地变压器的结构形式

我国接地变压器多采用 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 为变电站低压侧母线三相电压; i_A 、 i_B 、 i_C 为接地变压器高压侧三相电流; 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 、 L_1 、 L_2 、 L_3 为高压主绕组的电阻和电感; R_4 、 R_5 、 R_6 、 L_4 、 L_5 、 L_6 为高压移相绕组的电阻和电感; R_7 、 R_8 、 R_9 、 L_7 、 L_8 、 L_9 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。

依据图 1 所示的接地变压器等效电路图,绘制出接地变压器的 2 维模型示意图,如图 2 所示。

由图 1 和图 2 可知,接地变压器低压绕组靠近铁芯,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,其每相绕组分为主绕组和移相绕组 2 部分,反向套装在不同的铁芯柱上,2 者形成中性点后经消弧线圈接地。与常规配电变压器相比,ZNyn11 型接地变压器具有零序阻抗低及一、二次侧额定容量相差大等特点。

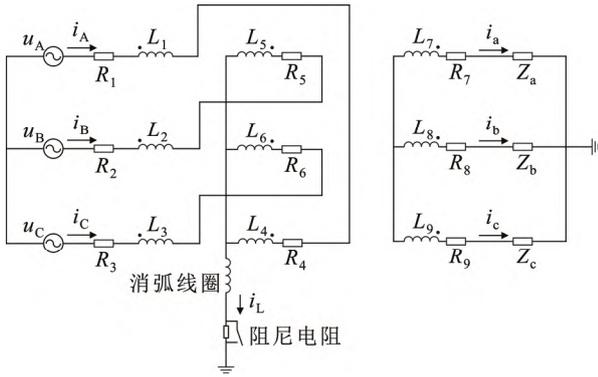


图1 接地变等效电路图

Fig.1 Grounding transformer equivalent circuit diagram

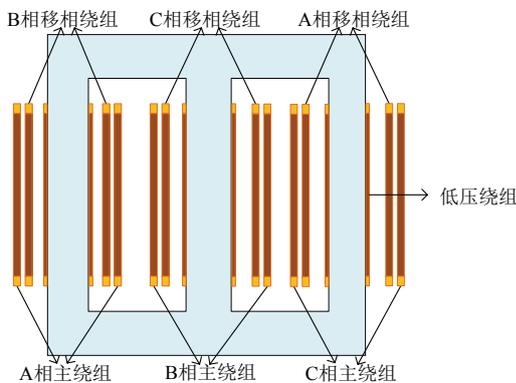


图2 接地变压器模型示意图

Fig.2 Grounding transformer model schematic

1.2 仿真模型的建立与验证

为了模拟出配电系统运行模式变化对接地变压器暂态特征的影响, 本文将接地变压器外部配电网电磁暂态模型和接地变压器多物理场模型相结合, 建立一种可以体现外部系统运行模式变化对接地变压器绕组暂态特征影响的多维仿真模型, 具体模型和流程如图3所示。

1) 以220 kV变电站的35 kV系统为例, 建立含接地变压器的配电网电磁暂态仿真模型, 通过设置配电网及接地变压器的运行模式, 仿真获取外部配电网系统及接地变压器绕组电压、电流等参数变化情况。

2) 构建数据传输层, 将接地变压器绕组电流参数储存到数据库中, 计算并生成接地变压器不同工况下绕组电流参数动态曲线。

3) 依据接地变压器实际尺寸参数, 建立接地变压器多物理场耦合模型, 将数据库中生成的接地变压器绕组电流动态曲线作为激励, 加载到接地变压器多物理场模型中, 得到不同运行工况下绕组暂

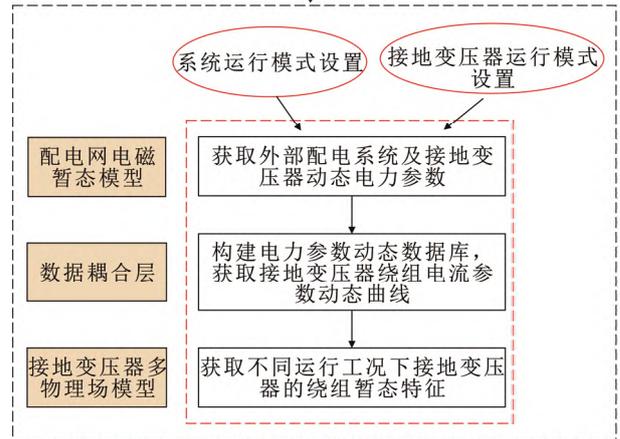
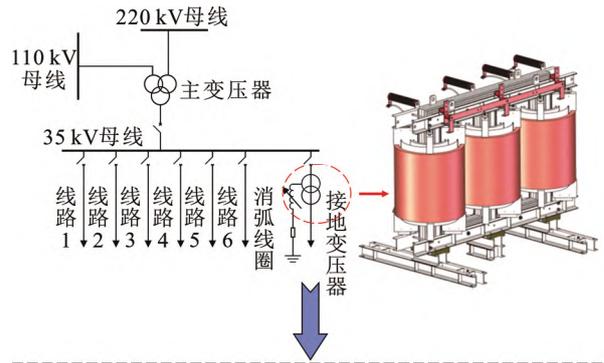


图3 接地变压器多维仿真流程图

Fig.3 Grounding transformer multi-dimensional simulation flow chart

态特征。

1.2.1 配电网电磁暂态模型

以某市220 kV变电站的35 kV系统为蓝本, 在电磁暂态仿真软件PSCAD中搭建与实际系统接线一致的配电网仿真模型, 模型结构如图4所示, 其中主变压器型号为SFPSZ7-150000/220, 接地变压器型号为DKSC-650/38.5-100/0.4; 消弧线圈型号为XHDCZ-630/35; 配电线路长度和技术参数如表1、表2所示。

为了验证配电网电磁暂态仿真模型的合理性, 查阅该220 kV变电站的单相接地故障案例, 在模型中设置与实际故障案例相同的单相接地故障, 通过对比母线电压仿真值与实际录波值来验证模型的准确性。查阅单相接地故障记录可知, 该站35 kV线路5曾经发生过单相接地故障, 故障相为A相, 相关线路保护装置发出接地告警, 以该实际故障案例为蓝本, 在电磁暂态模型中设置线路5的A相发生单相接地故障, 获取母线电压的仿真值, 查阅故障发生时母线的实际电压录波数据, 与母线电压仿真值进行对比, 对比结果如图5所示。

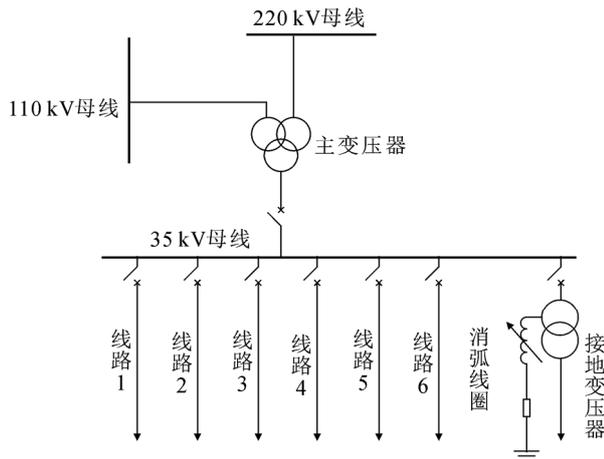


图4 配电网仿真模型结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of distribution network simulation model

表1 配电线路长度

Table 1 Distribution line lengths

线路	组成方式	电缆长度/m	架空线长度/m
1	混合线路	440	2 560
2	混合线路	120	2 080
3	电缆线路	1 440	0
4	电缆线路	1 440	0
5	电缆线路	4 500	0
6	架空线路	0	2 900

表2 配电线路技术参数

Table 2 Distribution line technical parameters

线路	电阻/($\Omega \cdot m^{-1}$)	电容/($F \cdot m^{-1}$)	感抗/($\Omega \cdot m^{-1}$)
架空线	1.71×10^{-4}	5.33×10^{-12}	3.83×10^{-4}
电缆	7.8×10^{-5}	1.94×10^{-10}	1.21×10^{-4}

由图5可知,系统单相接地运行时故障相电压趋近0,非故障相电压升至原来的 $\sqrt{3}$ 倍,符合系统单相接地运行特征,故障实际录波值与仿真值基本一致,验证了外部配电网电磁暂态模型的准确性。

1.2.2 接地变压器多物理场模型

1) 模型简化设置

根据接地变压器主要技术参数建立其3维几何模型,本文所采用的ZNyn11型接地变压器主要技术和结构参数如表3、表4所示。

基于以上参数在绘图软件SolidWorks中绘制接地变压器3维几何模型,为了使仿真更易收敛,忽略绕组匝间绝缘、铁芯夹件等部件的影响,只保留铁芯、绕组、绝缘筒及固定绕组的端部垫块,3维简化模型如图6所示。

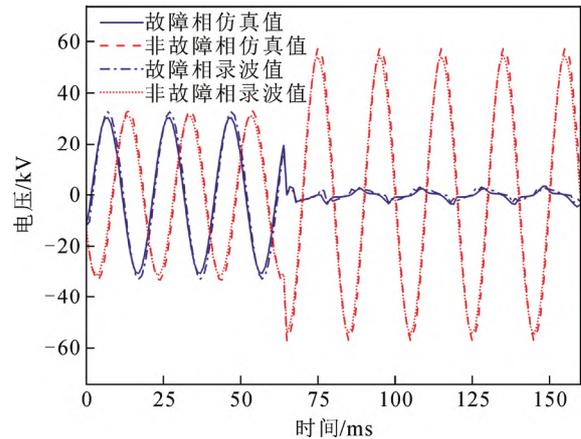


图5 系统单相接地运行时母线电压仿真与录波对比图

Fig.5 Comparison diagram of bus voltage simulation and wave recording during single-phase grounding operation of the system

表3 接地变压器主要技术参数

Table 3 Main technical parameters of grounding transformer

参数	取值	参数	取值
额定容量/kVA	650/100	站用额定电流/A	1.49/144.3
额定电压/kV	38.5/0.4	高压绕组匝数	2×1 050
额定电流/A	9.7/144.3	低压绕组匝数	18

表4 接地变压器主要结构参数

Table 4 Main structural parameters of grounding transformer

参数	取值	参数	取值
铁芯直径/mm	220	高压移相绕组直径/mm	432~464
铁轭高度/mm	220	高压主绕组直径/mm	556~588
铁芯窗高/mm	1 210	高压绕组高度/mm	820
低压绕组直径/mm	225~239	低压绕组高度/mm	820

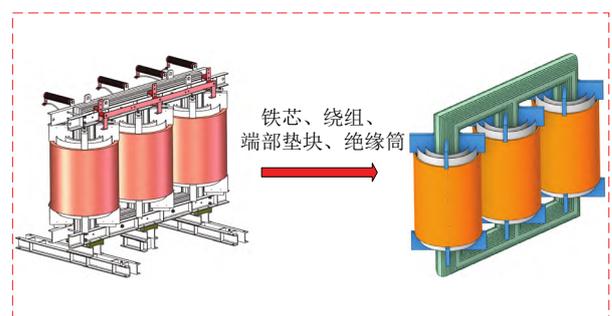


图6 接地变压器3维简化模型

Fig.6 3D simplified model of grounding transformer

2) 多物理仿真流程

将建立好的3维几何模型导入到有限元仿真软件中,依据实际运行特点建立接地变压器多物理场

仿真模型。其中接地变压器铁芯材料属性设置为 30Q120, 绕组材料为金属铜, 绕组端部垫块为环氧树脂, 绝缘纸筒为环氧玻璃纤维。模型由电磁场模块、温度场模块和结构场模块组成, 其仿真计算按照顺序耦合计算, 首先将配电网电磁暂态模型中获取到的接地变压器绕组电流动态曲线作为激励施加到电磁场模块中, 获取接地变压器绕组电磁参数变化规律; 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芯绕组的有功损耗作为载荷耦合到温度场模块中, 得到绕组温度分布规律, 仿真流程如图 7 所示。

3) 仿真模型设置

接地变压器电磁场模块选取 ANSYS 中的 3 维电磁场模块 Maxwell 3D, 为获取接地变压器绕组电磁暂态特征, 求解器选择瞬态磁场求解器。以接地变压器 3 维模型为基准, 各向拉伸 50% 绘制求解域, 求解域内的填充为空气, 求解域边界条件为磁力线平行。在激励源的设置上, 可在 Maxwell 3D 中选择 Design datasets 选项, 将接地变压器绕组动态电流曲线作为激励施加到电磁场模块中, 实现配电网电磁暂态模型与接地变压器多物理场模型间的数据传输。

接地变压器结构场模块选择 ANSYS 中的 3 维瞬态结构场 Transient Structural。结构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, 结构场载荷为电磁场模块所得的绕组电磁力密度。

考虑到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, 接地变压器温度场模块选取 ANSYS 中的流体仿真模块 Fluent。在温度场计算过程中, 由于接地变压器铁芯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; 高压绕组辐射热量较大, 需增设辐射边界条件, 辐射率取 0.9。设置空气为流体, 流体模型选择层流模型, 环境温度取 22 °C, 温度场载荷为电磁场模块所得的绕组和铁芯有功损耗。

4) 模型验证

为了验证接地变压器多物理场模型的准确性, 通过改变配电系统及接地变压器运行方式, 获取接地变压器绕组电流动态曲线, 将其传输到接地变

器多物理场模型中, 获得接地变压器损耗仿真值, 与出厂试验值进行对比, 验证模型的合理性。其中接地变压器的负载损耗是系统单相接地运行时接地变压器产生的损耗, 因此在配电网电磁暂态模型中设定系统单相接地运行, 获取接地变压器中性点流入允许的最大电感电流情况下绕组相关电力参数, 将其传输到接地变压器多物理场模型中获取负载损耗; 而空载损耗则只需要设定接地变压器处于空载运行状态下即可获得。对比结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 接地变压器空载损耗、负载损耗的仿真值和出厂试验值存在一定的误差, 这是由于在模型建立过程中, 对接地变压器相关结构进行了简化所致, 但误差均 ≤ 5%, 可认为接地变压器多物理场模型设置合理, 同时也证明了配电网电磁暂态模型与接地变压器多物理场模型之间数据传输成功。在此基础上, 仿真获取系统正常运行时的接地变压器绕组热点温度, 并与工程计算值进行对比^[24-25], 以进一步验证模型的准确性, 对比结果如表 6 所示。

由表 6 可知, 接地变压器绕组热点温度的仿真值与计算值基本一致, 相对误差 < 5%, 可以满足对绕组温度变化规律定性分析的需要, 进一步验证了接地变压器多物理场模型的准确性。同时证明配电网电磁暂态模型和接地变压器多物理场模型间数据耦合成功。

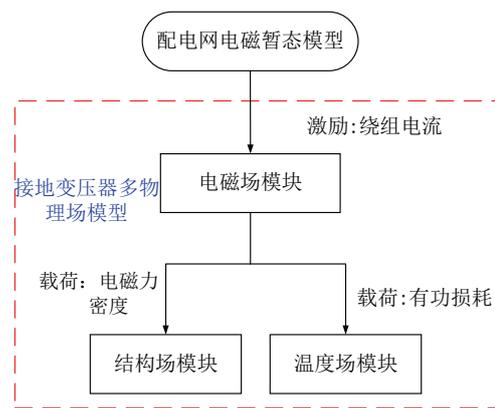


图 7 多物理场仿真流程图

Fig.7 Multi-physics field simulation flow chart

表 5 接地变压器损耗参数仿真值与出厂试验值对比
Table 5 Comparison between simulation value and factory test value of grounding transformer loss parameter

损耗	仿真值/W	试验值/W	相对误差/%
空载损耗	1 005.62	1 054	4.59
负载损耗	4 954.56	5 118	3.19

2 系统单相接地运行对接地变压器绕组暂态特征的影响分析

2.1 绕组电流分析

在配电网电磁暂态模型中设置系统发生单相接地故障，故障位置为线路5的A相末端，消弧线圈脱谐度为-5%，故障发生时间设置为正常运行后的0.11 s。仿真得到系统单相接地运行前后接地变压器高、低压绕组电流变化情况如图8和图9所示。

由图8可知，系统单相接地运行前后，接地变压器低压绕组电流波形未发生明显变化，其电流特性基本不变，低压绕组仍然保持着正常运行状态，变电站各类电气设备仍可获得稳定的电能。

由图9可知，系统单相接地运行前后，接地变压器高压绕组三相电流波形发生明显变化。系统正常运行时，高压绕组三相电流有效值基本相等，为1.49 A，系统单相接地运行后，高压绕组电流激增，经过约4个周波后，电流非周期分量消失，电流基本稳定。高压C相电流最大，有效值为9.20 A，相比系统正常运行时上升了517.4%。系统正常运行

表6 绕组热点温度的仿真值与工程计算值对比

Table 6 Comparison of simulation value and engineering calculation value of winding hot spot temperature

绕组	热点温度/°C		相对误差/%
	仿真值	计算值	
高压主绕组	25.36	25.02	1.36
高压移相绕组	26.63	25.76	3.38
低压绕组	83.15	79.65	4.39

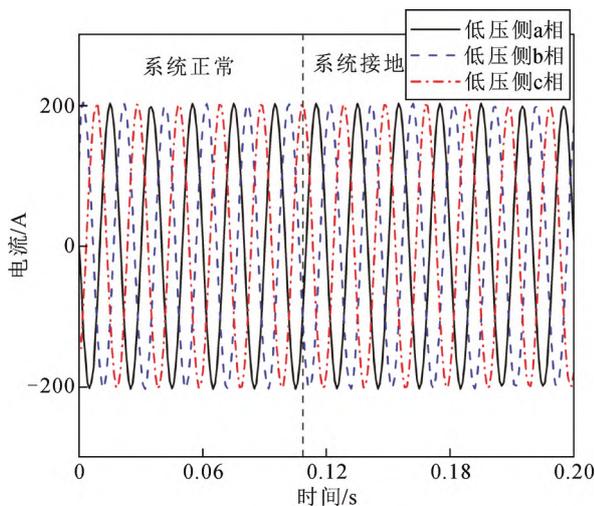
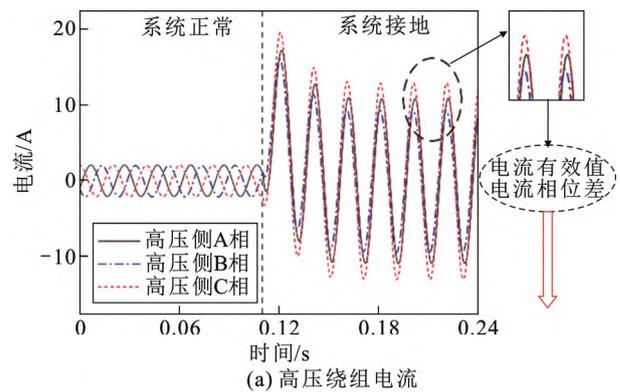


图8 系统单相接地运行前后低压绕组电流

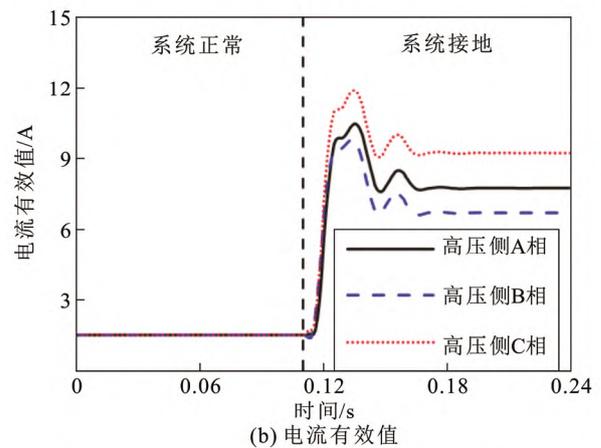
Fig.8 Low-voltage winding current before and after single-phase grounding operation in the system

时，高压绕组三相电流相位差基本相等，互差约120°，系统单相接地运行后，各相电流相位趋于一致，稳定后的最大电流相位差仅为19.2°，相比系统正常运行时下降了84.0%。

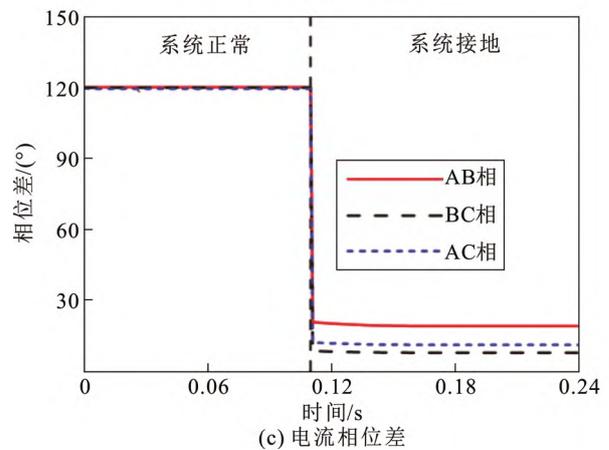
综上所述，系统单相接地运行会使接地变压器高压绕组电流特性发生改变，导致高压绕组三相电流增大、电流相位差减小。而接地变压器低压绕组电流特性不受系统单相接地运行的影响，因此后文主要针对接地变压器高压绕组暂态特征展开分析。



(a) 高压绕组电流



(b) 电流有效值



(c) 电流相位差

图9 系统单相接地运行前后高压绕组电流

Fig.9 High-voltage winding current before and after single-phase grounding operation in the system

2.2 绕组磁场分析

将电磁暂态模型中得到的绕组电流数据耦合到接地变压器多物理场模型中, 仿真获取绕组磁场、受力形变、温度等暂态物理特征变化。

为了更好地分析系统单相接地运行前后接地变压器磁场分布情况, 在高压绕组内部选取不同的仿真路径, 仿真路径与绕组轴线平行。选取方式如图 10 所示, 其中路径 1—6 位于高压主绕组内部, 路径 7—12 位于高压移相绕组内部。以 B 相电流最大时刻为例, 分析系统单相接地运行前后接地变压器高压绕组内部漏磁分布情况, 见图 11 和图 12。

由图 11 可知, 系统正常运行时, 接地变压器高压主绕组和移相绕组漏磁分布规律相同, 2 者 B 相芯柱上的绕组内部漏磁最大, A、C 2 相芯柱上的绕组内部漏磁关于中间移相绕组呈对称分布; 同芯柱上高压移相绕组的漏磁略大于主绕组, 且绕组端部漏磁要大于中部。

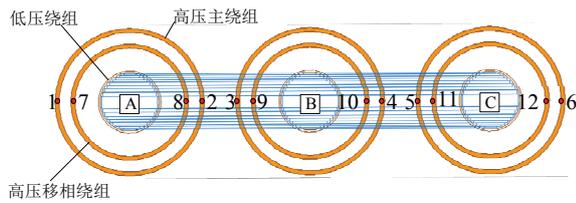
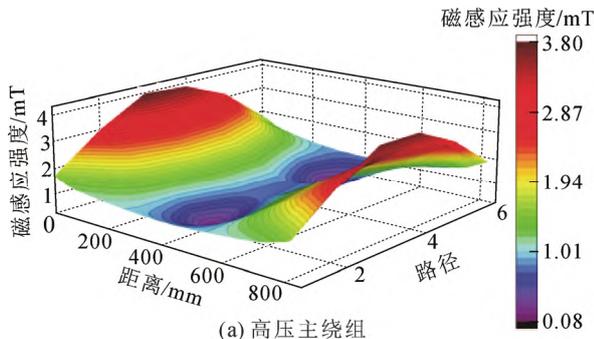
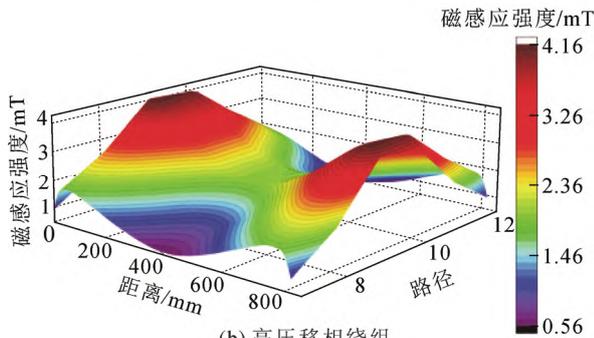


图 10 仿真路径

Fig.10 Simulation paths



(a) 高压主绕组



(b) 高压移相绕组

图 11 系统正常运行时高压绕组内部漏磁场分布

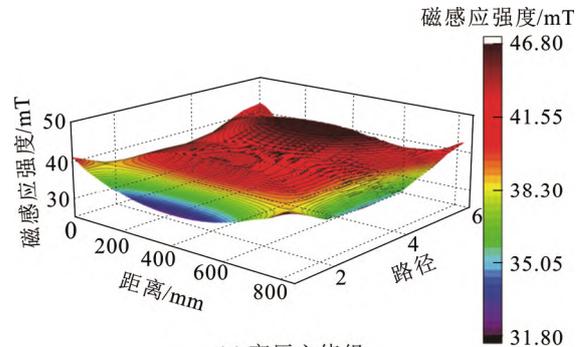
Fig.11 Distribution of leakage field inside the high-voltage winding during normal operation of the system

由图 12 可知, 系统单相接地运行时, 接地变压器高压主绕组和移相绕组内部漏磁感应强度激增, 为系统正常运行时的 10 余倍, 2 者分布规律发生改变。同芯柱上高压主绕组漏磁场大于移相绕组, 中部漏磁场大于端部, 而移相绕组端部漏磁大于中部。

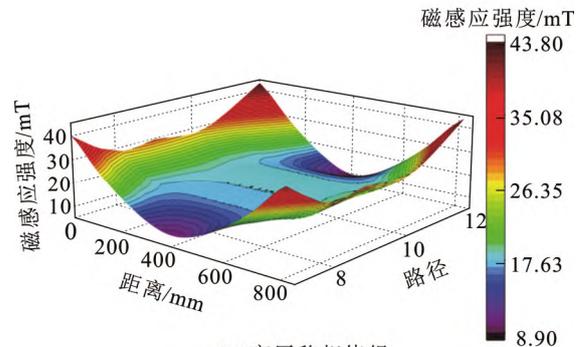
接地变压器绕组漏磁场分布规律由绕组电流密度和绕组位置共同决定^[26], 结合 B 相芯柱上绕组漏磁分布剖面图对上述仿真结果进行进一步分析, 如图 13 所示, 图中 B 为磁感应强度。系统正常运行时, 高压绕组电流密度远小于低压绕组, 磁力线主要闭合区域在低压绕组附近, 因此靠近低压绕组的高压移相绕组漏磁感应强度要大于主绕组。系统单相接地运行时, 高压绕组电流激增, 电流密度增大, 漏磁场向高压主绕组外侧偏移, 相间漏磁增大, 导致高压主绕组和移相绕组漏磁感应强度增大并且改变其漏磁场分布规律。

2.3 绕组形变分析

系统单相接地运行 10 ms 时故障电流最大, 绕组形变情况最为明显, 为更好地分析绕组形变规律, 对比系统正常运行 10 ms 时刻和系统单相接地运行 10 ms 时刻接地变压器绕组形变情况, 见图 14、15。



(a) 高压主绕组



(b) 高压移相绕组

图 12 系统单相接地运行时高压绕组内部漏磁场分布

Fig.12 Distribution of leakage magnetic field in the high-voltage winding during single-phase grounding operation of the system

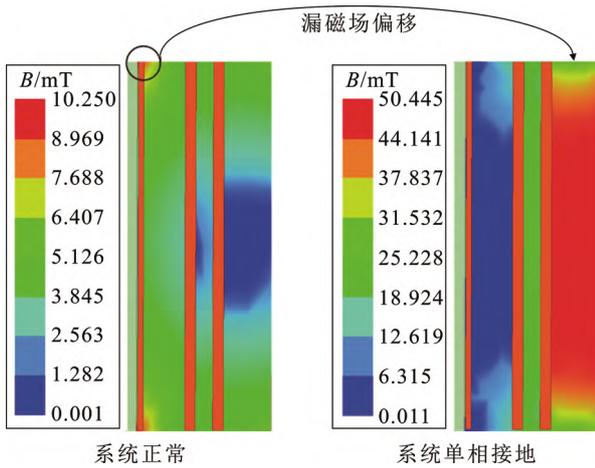


图 13 B 相芯柱上绕组漏磁分布剖面图

Fig.13 Profile of winding leakage distribution on B-phase core column

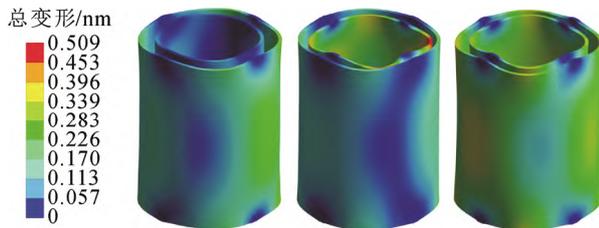


图 14 系统正常运行时高压绕组形变云图

Fig.14 Cloud diagram of high-voltage winding deformation during system normal operation

由图 14 和图 15 可知, 系统正常运行时, 接地变压器高压主绕组和移相绕组均呈向外膨胀的趋势, 并且高压移相绕组形变量略大于主绕组, 最大形变量为 5.09×10^{-7} mm。系统单相接地运行时, 高压绕组形变量激增, 主绕组形变量略大于移相绕组, 最大形变量可达 9.46×10^{-5} mm, 为系统正常运行时的 185.85 倍, 并且形变规律发生改变。不同芯柱上绕组相邻部分相互排斥, B 相芯柱上绕组向内挤压收缩, A 相和 C 相芯柱上绕组向外排斥扩大。可借助绕组所受电磁力示意图对上述现象进行分析, 如图 16 所示^[27-28], 图中 F_y 为绕组纵向所受电磁力, F_x 为绕组辐向所受电磁力。

系统正常运行时, 磁力线主要闭合区域位于低压绕组附近, 可以忽略相间漏磁对高压绕组受力的影响, 此时接地变压器绕组所受电磁力主要如图 16(a)所示。在漏磁场的作用下, 低压绕组受到向铁芯挤压的辐向力, 高压绕组主绕组和移相绕组受到向外拉伸的辐向力。当系统单相接地运行时, 漏磁

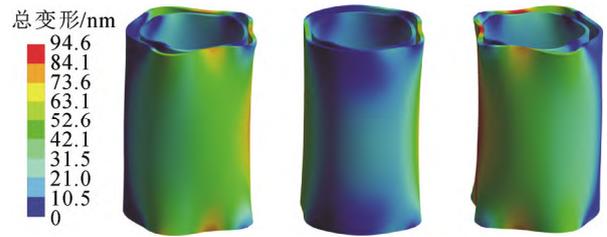


图 15 系统单相接地运行时高压绕组形变云图

Fig.15 Cloud diagram of high-voltage winding deformation during system single-phase grounding operation

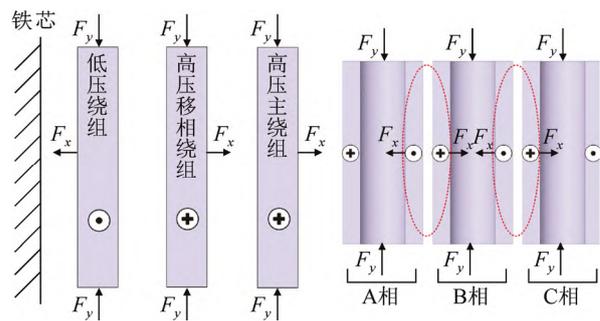


图 16 绕组受力示意图

Fig.16 Winding stress diagram

场增大且向高压绕组方向偏移, 绕组的相间漏磁占据主导地位, 此时高压绕组所受电磁力主要如图 16(b)所示。在相间漏磁的作用下, 2 个绕组相近的部位(虚线区域)辐向电磁力方向相反, 2 个绕组受到相互排斥的电磁力, 进而使 A、C 两芯柱上高压绕组受到向外的排斥力, B 相芯柱上高压绕组受到向内的挤压力。

由仿真分析可知, 系统单相接地运行时, 接地变压器高压绕组最大形变量仅为 9.46×10^{-5} mm, 绕组并未发生明显形变。考虑到中低压配电系统单相接地运行次数频繁, 因此有必要在分析接地变压器绕组形变规律过程中考虑累积效应的影响。对高压绕组施加如图 17 所示的等效冲击电流。

图 17 中, 各相绕组的电流峰值采取系统单相接地运行后的最大相电流幅值, 设置冲击次数为 6 次, 时间间隔为 20 ms, 每个周期代表 1 次冲击电流的加载与卸载过程, 并将每次受到冲击电流发生形变后的绕组模型作为下一次的短路故障的初始模型, 仿真计算结果如图 18 所示。

由图 18 可知, 在冲击电流加载过程中, 接地变压器高压绕组形变量迅速增大; 而在冲击电流卸载过程中, 高压绕组形变量迅速减小直至为 0; 累

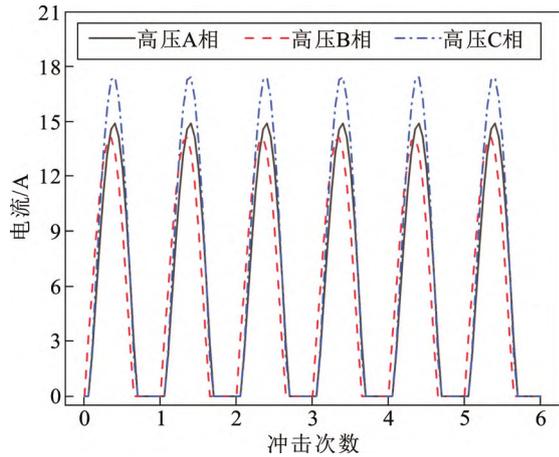


图 17 高压绕组等效冲击电流

Fig.17 Equivalent impulse current of high voltage winding

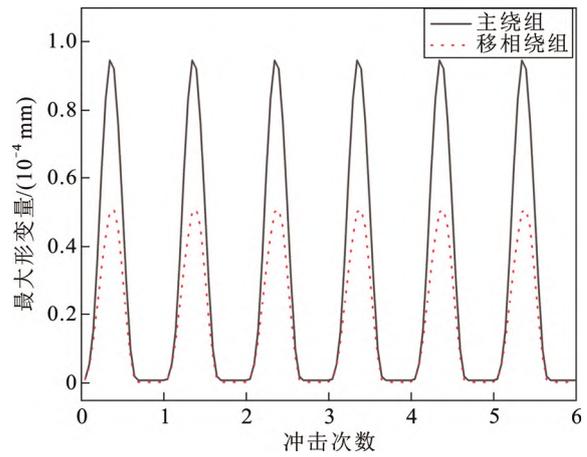


图 18 高压绕组累积变形情况

Fig.18 Cumulative deformation of high voltage winding

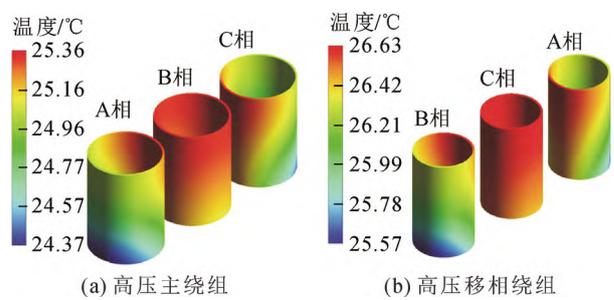
积 6 次系统单相接地电流冲击后, 接地变压器高压绕组残余形变量仍为 0, 显然在该工况下多次电流冲击并未使高压绕组产生明显变形。由此可见, 系统单相接地运行虽然会改变接地变压器绕组受力变形规律, 但绕组形变量小, 累积效应较弱。

2.4 绕组温度分析

系统单相接地运行时, 接地变压器高压绕组电流激增, 使其有功损耗增加。同时考虑到小电流接地系统单相接地运行时允许系统带故障运行 1~2 h, 因此在分析接地变压器绕组温度特性时, 需要考虑系统长时间单相接地运行对高压绕组温度特性的影响。对此本文仿真获得系统单相接地运行前后, 接地变压器高压绕组稳态温度分布云图(图 19 和图 20)及高压绕组温升曲线(图 21)。

由图 19 可知, 当系统正常运行时, 接地变压器高压绕组仅承担变电站站用负荷, 其有功损耗小, 绕组热点温度为 26.63℃。由于高压移相绕组位于主绕组的内侧, 气道较窄, 因此散热条件不如高压主绕组, 其温度会略高于主绕组。同理, 位于三相绕组中间的绕组散热条件相对较差, 其温度也会略高于两侧绕组。此外, 从图 19 中还可以看出, 高压绕组上端的温度高于下端, 这是由于气道内的空气受热膨胀后, 会沿着气道向上流动, 在流动过程中与壁面产生摩擦, 导致流速逐渐减小, 进而使其散热效果变差。

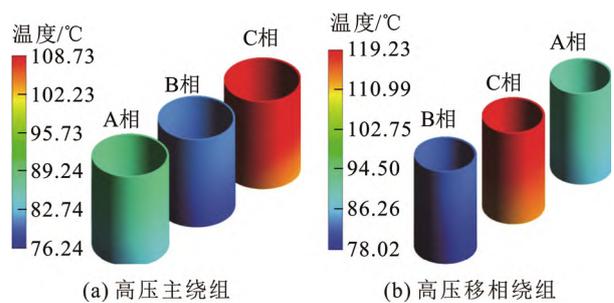
由图 20 可知, 系统单相接地运行后, 接地变压器高压移相绕组温度激增, 最高温度达到 119.23℃, 相比于系统正常运行时升高 92.60℃, 增长 347.73%, C 相高压绕组温度明显高于其他 2



(a) 高压主绕组 (b) 高压移相绕组

图 19 系统正常运行时高压绕组温度分布

Fig.19 Temperature distribution of high voltage winding during normal operation of the system



(a) 高压主绕组 (b) 高压移相绕组

图 20 系统单相接地运行时高压绕组温度分布

Fig.20 Temperature distribution of high voltage winding during single-phase grounding operation of the system

相, 符合接地变压器绕组电流变化规律, 并且由于接地变压器绕组采取特殊的 Z 型联结, 同相的高压主绕组和移相绕组分别布置在不同的芯柱上, 致使同一芯柱上的高压主绕组和移相绕组温度相差较大。

由图 21 可知, 系统单相接地运行 2 h 内, 高压移相绕组温升增长速度最快, 可达 88.06℃, 相比

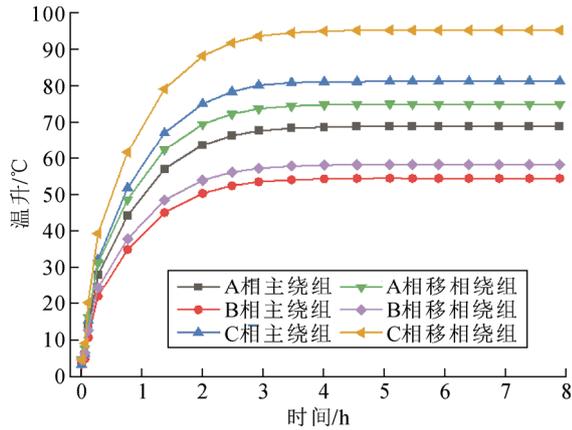


图 21 系统单相接地运行时高压绕组温升曲线

Fig.21 Temperature rise curve of high voltage winding during single-phase grounding operation of the system

于系统正常运行时温度增长了 83.44 °C。而系统单相接地运行超过 2 h 后, 高压绕组温升增长速度变缓, 达到稳态时为 95.11 °C, 仅增加 7.05 °C。相比于绕组受力形变, 绕组温度受系统单相接地运行的影响极大, 因此在接地变压器状态检测及相关保护定值整定过程中, 不可以忽略系统单相接地运行对绕组温度的影响。

3 结论

通过建立接地变压器多维仿真模型, 研究系统单相接地运行对接地变压器绕组暂态特征的影响, 具体结论如下:

1) 建立一种由配电网电磁暂态模型和接地变压器多物理场模型组成的多维仿真模型, 通过模型间的数据耦合, 分析系统单相接地运行时电力参数变化对接地变压器绕组暂态特征的影响。

2) 系统单相接地运行, 接地变压器低压侧电流特性不变, 高压侧三相电流最大值相比于系统正常运行时增长 517.4%、电流相位差最大值减小 84.0%, 高压绕组漏磁增大且向高压主绕组外侧方向偏移。

3) 系统正常运行, 接地变压器高压主绕组和移相绕组受力均呈向外排斥。A 相接地运行, 高压绕组形变随电磁特性发生变化, A、C 2 相芯柱绕组受力呈向外排斥, B 相芯柱绕组受力呈向内挤压, 绕组形变量增大, 但在多次单相接地故障冲击下绕组无明显变形, 累积效应较弱。

4) 在系统单相接地运行 2 h 内, 高压绕组温度变化明显, 移相绕组最高温度比系统正常运行时增加 83.44 °C, 同芯柱高压主绕组和移相绕组温差增大。

参考文献 References

- [1] 闫涛, 李蕊, 刘伟, 等. 基于改进停电序列多状态模型的新型配电系统故障恢复方案解析优选方法[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 473-481.
YAN Tao, LI Rui, LIU Wei, et al. Analytic optimization method of fault recovery scheme for new distribution network based on modified multi-state power interruption sequence model[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 473-481.
- [2] NIU L, WU G Q, XU Z S. Single-phase fault line selection in distribution network based on signal injection method[J]. IEEE Access, 2021, 9: 21567-21578.
- [3] 曾祥君, 李理, 喻锐, 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): 2953-2965.
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): 2953-2965.
- [4] DONG X Z, SHI S X. Identifying single-phase-to-ground fault feeder in neutral noneffectively grounded distribution system using wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1829-1837.
- [5] 吴益航. 基于相量法的 35 kV 接地变兼站用变系统单相失地运行分析[J]. 电工技术, 2019(9): 84-85, 87.
WU Yihang. Analysis of single phase grounding lost operation of 35 kV grounding transformer and station transformer system based on phasor method[J]. Electric Engineering, 2019(9): 84-85, 87.
- [6] 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 configuration of protection[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(17): 152-153.
- [7] 曾祥君, 王沾, 喻锐, 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.
- [8] 曾祥君, 卓超, 喻锐, 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): 1523-1533.
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): 1523-1533.
- [9] 张慧源. 小电阻接地变压器保护误动分析[J]. 农村电气化, 2019(1): 74-75.
ZHANG Huiyuan. Analyses of protection malfunction in small earthing transformers[J]. Rural Electrification, 2019(1): 74-75.
- [10] 潘超, 石晓博, 刘春明, 等. GIC/HVDC 对地电流入侵接地变压器的多场耦合与状态识别[J/OL]. 高电压技术, 2024: 1-14 [2024-06-11]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240259>.
PAN Chao, SHI Xiaobo, LIU Chunming, et al. Multi-field coupling and state identification of grounding transformers with GIC/HVDC ground current intrusion[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-14 [2024-06-11]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240259>.
- [11] XIAN R C, WANG L L, ZHANG B Q, et al. Identification method of interturn short circuit fault for distribution transformer based on power

- loss variation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(2): 2444-2454.
- [12] 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.
- [13] 胡晨旺. 接地变压器的故障分析与保护设计[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
HU Chenwang. Fault analysis and the protection design of grounding transformer[D]. Changsha, China: Changsha University of Science & Technology, 2012.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 江长明, 黄猛, 郝震, 等. 交流电压下油纸绝缘放电发展过程中电-磁-声特征参量的变化规律[J]. 高电压技术, 2024, 50(8): 3805-3813.
JIANG Changming, HUANG Meng, HAO Zhen, et al. Variation of electrical-magnetic-acoustic characteristic parameters during the development of oil-pressboard insulation discharge under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3805-3813.
- [18] 周远翔, 林孟龙, 陈健宁, 等. 基于自注意力生成对抗网络的电力设备在线监测缺失数据填补[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1795-1809.
ZHOU Yuanxiang, LIN Menglong, CHEN Jianning, et al. Missing data imputation for online monitoring of power equipment based on self-attention generative adversarial networks[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1795-1809.
- [19] 张璐, 王文森, 韩彦华, 等. 基于多维参量复合感知的变压器套管智能监测[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 2934-2944.
ZHANG Lu, WANG Wensen, HAN Yanhua, et al. Intelligent monitoring of transformer bushing based on multi-parameter compound sensing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2934-2944.
- [20] 李璨, 咸日常, 崔永, 等. KYN系列12kV开关柜真空断路器灭弧室触头温度间接测算[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4355-4363.
LI Can, XIAN Richang, CUI Yong, et al. Indirect measurement of arc-extinguishing chamber contact temperature of KYN series 12 kV switch cabinet vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4355-4363.
- [21] XIAN R C, HU Y Y, ZHANG B Q, et al. Comparative analysis of the characteristics of outlet short circuit and winding insulation fault of distribution transformer and its preventive measures[J]. High Voltage, 2024, 9(3): 700-709.
- [22] 席国强. 基于ANSYS的ZN型接地变压器仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
XI Guoqiang. Simulation and research of ZN earthing transformer based on ANSYS[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2014.
- [23] 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.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力变压器 第12部分: 干式电力变压器负载导则: GB/T 1094.12—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Power transformers—part 12: loading guide for dry-type power transformers: GB/T 1094.12—2013[S]. Beijing, China: China Standard Publishing House, 2014.
- [25] 黄娇. 干式变压器温度场的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
HUANG Jiao. The research on the temperature field of dry-power transformer[D]. Qingdao, China: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [26] 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.
- [27] 于少泽, 咸日常, 李海涛, 等. SBH15型非晶合金变压器短路电动力分析及优化措施[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8187-8192.
YU Shaoze, XIAN Richang, LI Haitao, et al. Optimization of short-circuit electromotive force of SBH15 amorphous alloy transformer[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 8187-8192.
- [28] 王万超. 多次短路下变压器绕组短路强度与稳定性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
WANG Wanchao. Research on mechanical strength and stability of transformer windings under multiple short-circuit conditions[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2017.



XIAN Richang
Professor



LI Jiayang
Corresponding author

咸日常

1966—, 男, 硕士, 教授, 博导
主要研究方向为电力系统过电压、电气设备在线监测与故障诊断技术
E-mail: xianrc@163.com

李嘉洋(通信作者)

1999—, 男, 硕士, 工程师
主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断技术
E-mail: 784218168@qq.com

收稿日期 2024-06-11 修回日期 2024-12-10 编辑 程子丰