

The Influence Mechanism of Partial Discharge on the Measurement Accuracy of Current Transformers

Jinhong Wang

China Machinery General Institute Group Shanxi Electromechanical Research Institute Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030009, China

Abstract

As a critical metering and protection device within the power system, the accuracy of current transformers is directly related to the safe and stable operation of the power system. Partial discharge, a common manifestation of insulation defects within current transformers, can impair the normal functioning of the equipment through various channels, thereby affecting measurement accuracy. This paper begins with the intrinsic characteristics of partial discharge and, in conjunction with the structural principles and operational mechanisms of current transformers, conducts an in-depth analysis of the core mechanisms by which partial discharge reduces measurement accuracy. These mechanisms include the degradation of insulation performance, distortion of magnetic field distribution, changes in the magnetization characteristics of the core, and drift in equivalent circuit parameters. The study reveals the underlying logic and operational patterns of each influencing pathway, providing theoretical support for the condition monitoring and accuracy control of current transformers.

Keywords

partial discharge; current transformer; detection accuracy; influence mechanism; insulation degradation

局部放电对电流互感器检测精度的影响机制

王进红

中国机械总院集团山西机电研究院有限公司, 中国·山西太原 030009

摘要

电流互感器身为电力系统内关键的计量和保护装置,其检测精度切实关联着电力系统的安全稳定运转情况。局部放电作为电流互感器内部常见的绝缘缺陷呈现形式,会借助多种渠道对设备正常工作状况进行破坏,进而对检测精度造成影响。本文从局部放电的本质特征之处出发,联合电流互感器的结构原理与工作机理情况,深入地对局部放电使得检测精度降低的核心机制展开分析,包含绝缘性能出现劣化、磁场分布产生畸变、铁芯磁化特性发生改变以及等效电路参数出现漂移这四个维度内容,揭示出各影响路径的内在逻辑和作用规律情况,给电流互感器的状态监测与精度控制提供理论方面的支撑。

关键词

局部放电; 电流互感器; 检测精度; 影响机制; 绝缘劣化

1 引言

电流互感器于电力系统之中担负着电流变换与信号传递的重要功能,其输出信号的准确性成为继电保护装置可靠做出动作、电能计量实现精准计量的前提条件。随着电力系统电压等级的提升和运行年限的增加,电流互感器内部绝缘材料容易受到电、热、机械应力等多重因素的作用与影响,出现局部放电现象。局部放电并非属于瞬间破坏性故障,不过其长期存在会逐渐对设备内部结构进行侵蚀,使得检测精度出现隐性下降情况,倘若未及时进行防控,可能会引发严

重的电力安全事故。现有的研究大多将焦点聚焦在局部放电的检测方法或者电流互感器精度校准技术方面,对于二者之间的内在影响机制缺乏深入的探讨。所以,系统地对局部放电影响电流互感器检测精度的核心路径和作用机理进行剖析,具备重要的理论和工程意义^[1]。

2 局部放电与电流互感器的核心特性

2.1 局部放电的本质与表现形式

局部放电指的是在电场的作用之下,电气设备绝缘内部或者表面局部区域所发生的击穿放电现象,其特征为放电区域没有贯穿整个绝缘间隙,放电能量相对较小但持续反复。电流互感器内部的局部放电主要是来自绝缘缺陷问题,像绝缘介质里的气泡、杂质、电极边缘电场出现集中情况、绝缘老化所产生的微小裂纹等。这些缺陷会使得局部电场强

【作者简介】王进红(1968-),男,中国山西长治人,本科,助理工程师,从事电流互感器电压互感器测量仪器及检验检测方法的研究。

度超出介质耐受场强范围,从而引发电子雪崩效应,形成脉冲式放电现象。局部放电过程当中会伴随有电荷转移、电磁

辐射、热能释放等物理现象,这些现象会直接作用于电流互感器的核心部件,给后续检测精度下降埋下隐患伏笔^[2]。

表 1 电流互感器局部放电相关特性数据表

类别	具体内容
局部放电定义	在电场作用下,电气设备绝缘内部或表面局部区域发生的击穿放电现象,放电区域未贯穿整个绝缘间隙,放电能量小且持续反复
主要诱因	绝缘缺陷,包括:1.绝缘介质中的气泡、杂质2.电极边缘电场集中3.绝缘老化产生的微小裂纹
发生机理	绝缘缺陷导致局部电场强度超出介质耐受场强范围,引发电子雪崩效应,形成脉冲式放电
伴随物理现象	电荷转移、电磁辐射、热能释放
潜在危害	直接作用于电流互感器核心部件,导致后续检测精度下降

2.2 电流互感器的工作原理与精度保障条件构建

电流互感器以电磁感应原理作为运行根基,其基础构造涵盖一次绕组架构、二次绕组体系、铁芯物质及绝缘外壳装置。常规运作情形之下,一次绕组部件串联于被测电路网络当中,借助电磁耦合模式把一次侧高强度电流转化成为二次侧标准低量电流形态(一般呈现为5A或者1A数值),为测量仪表设备或保护装置系统提供使用支撑。检测精度的保障依托于三项核心条件要素:其一为铁芯结构的磁化特性维持稳定状态,规避出现饱和现象或磁滞损耗异常状况;其二是一次绕组与二次绕组之间的匝数比例保持精确数值,电磁耦合效率达成一致水准;其三为绝缘系统的性能处于良好状态,不存在额外的泄漏电流情况或局部导电通道结构。此三项条件要素彼此产生关联影响,任意一项环节遭受破坏作用,均将使得电流变换的比例关系脱离设计数值范围,进而对检测精度指标造成影响后果^[3]。

3 局部放电作用于检测精度的核心作用机制

3.1 绝缘性能退化引发泄漏电流干扰效应

局部放电对绝缘材料的侵蚀属于渐进式过程形态。放电进程当中产生的高能粒子群体(包含电子、离子物质)会对绝缘介质分子实施撞击作用,造成分子链出现断裂现象、化学键产生破坏后果,致使绝缘材料的介电性能呈现下降趋势,具体表现为介电常数处于不均匀状态、绝缘电阻数值降低情形。伴随绝缘退化程度不断加深,介质内部空间会形成微小导电通道结构,此类通道成为泄漏电流的流通过程载体。泄漏电流的实际存在打破了电流互感器内部的电流平衡状态:一部分一次侧电流通过泄漏通道结构直接产生流失现象,未能参与电磁耦合进程环节,造成二次侧感应电流数值偏小情况;与此同时,泄漏电流具备随机性特征与不稳定性特质,会跟随局部放电强度指标、环境温度参数、电压波动状况等因素产生变化情形,进一步加剧二次电流的波动幅度。此类非稳定状态的泄漏电流干扰作用,使得电流互感器的变换比例产生动态偏差数值,检测精度水平出现显著下降局面^[4]。

3.2 磁场分布变异破坏电磁耦合稳定状态

电流互感器的精确电流变换依赖于铁芯结构内部磁场

的均匀分布状态与稳定变化进程。局部放电进程当中伴随的电荷转移现象会生成瞬时脉冲电流形态,该脉冲电流会激发局部交变电磁场结构,此附加电磁场与铁芯内部的主磁场产生相互叠加作用,致使铁芯内部的磁场分布出现变异状况。一方面,脉冲电流的瞬时性质会使磁场强度产生突变现象,打破主磁场的平稳变化规律体系,造成二次绕组感应电动势的波形出现变异形态,产生尖峰脉冲结构或平顶失真现象,对测量仪表设备对电流有效值的准确计算过程形成影响;另一方面,局部放电现象多发生于电极边缘区域、绝缘缺陷部位等区域空间,此类区域的附加电磁场具备高度集中性质,会造成铁芯局部区域的磁通量密度出现异常升高状况,甚至引发局部磁饱和现象。铁芯局部饱和状态会使磁导率出现显著下降趋势,电磁耦合效率产生降低后果,且饱和区域的扩展过程具备不确定性特征,造成一次侧与二次侧之间的电流变换比例关系呈现非线性变化态势。此外,畸变磁场还会促使铁芯的磁滞损耗与涡流损耗提升,这些损耗以热能形态释放,进一步对铁芯的磁化特性产生作用,造就“磁场畸变—损耗上升—特性变坏”的恶性循环,不断对电磁耦合的稳定性能进行损害^[5]。

3.3 铁芯磁化特性的转变造成变流比例的偏移

铁芯作为电流互感器磁路方面的核心构成,其磁化特性直接对电磁耦合的效率起到决定性作用。局部放电所产生的热能和电磁辐射会直接施加于铁芯之上:一方面,放电进程当中所释放的热量会让铁芯的温度有所升高,若长时间累积,会造成铁芯材料的居里温度产生偏移,磁化率随之下降,磁滞回线变宽,磁滞损耗增多;另一方面,局部放电产生的电磁脉冲会对铁芯的磁畴结构形成冲击,造成磁畴的排列变得杂乱,磁滞现象变得严重,即便处于正常工作电流的范围之内,也会出现显著的磁化非线性状况。铁芯磁化特性的改变会直接对变流比例产生影响:在磁化曲线的线性阶段,磁导率的降低会造成二次感应电流的幅值变低;当出现局部磁饱和情况时,二次电流会产生平顶波失真现象,有效值计算的偏差会变大;而磁滞现象的加剧会使电流变换出现相位偏差,特别是在交流电路当中,相位偏差会致使功率测量、保护装置动作判据等出现误差。这种由于铁芯磁化特性改变所引发的变流比例偏移,具有不可逆转的特性,随着局部放电

时间的延长,偏差会持续变大。

3.4 等效电路参数的漂移对固有平衡造成破坏

电流互感器的工作状况能够通过等效电路模型来进行描述,其等效参数包含一次绕组电感、二次绕组电感、互感、绝缘电阻、分布电容等。局部放电借助多种途径使这些参数发生漂移:一是绝缘出现劣化,让绝缘电阻降低、分布电容增大,并且分布电容的分布状态变得不再均匀;二是磁场发生畸变以及铁芯磁化特性改变,造成一次绕组电感、二次绕组电感以及互感值出现波动;三是局部放电产生的热能使绕组导线的电阻增大,进一步对电路参数的平衡产生影响。等效电路参数的漂移打破了电流互感器原有的设计平衡,致使其在不同工作条件下的变流特性出现不一致的情况。比如,分布电容的增大可能会使互感器在高频段出现谐振现象,让二次电流的幅值异常升高;互感值的波动则会直接改变一次侧与二次侧的耦合系数,造成变流比例不稳定。这些参数漂移所带来的影响具有叠加效应,最终体现为检测精度的系统性下降,而且这种下降通常具有隐蔽的特性,难以通过常规的校准方法进行完全的补偿。

4 影响机制的层叠效应与精度滑落的递进关联

局部放电针对电流互感器检测精度的作用并非单个机制单独运作,而是各类机制彼此勾连、层叠放大的状况。起始时期,局部放电程度较轻,主要体现为轻度的绝缘退化与细微的磁场扭曲,此时检测精度滑落不突出,多呈现为偶然的细小偏差;伴随局部放电持续演进,绝缘退化加重,泄漏电流变大,同时磁场扭曲范围扩展,铁芯磁化特性开始产生不可逆转的变化,检测精度滑落呈现显著态势,偏差数值逐步变大且稳定性变弱;当局部放电演进至特定程度,等效电路参量发生明显偏移,各类影响机制形成层叠效应:泄漏电流干扰与磁场扭曲相互推动,铁芯磁化非线性与参量偏移共同运作,致使电流互感器的变流比例严重脱离设计数值,检测精度大幅滑落,甚至超越允许误差范畴,难以满足计量或保护需求。

这种递进关联的核心在于局部放电的“聚集效应”——

每一回放电均会对设备造成微小损害,这些损害逐步累积,使各类影响机制从“潜在形态”转变为“显性作用”,最终造成检测精度的不可逆转滑落。除此之外,外部环境要素(像温度、湿度、电压波动)会加快这一递进进程,举例来说,高温环境会降低绝缘材料的耐受场强,使局部放电更易出现,同时加重铁芯磁化特性的恶化,进一步扩大各类机制的作用效果。

5 结语

局部放电借助绝缘性能退化、磁场分布扭曲、铁芯磁化特性改变以及等效电路参量偏移四个核心机制,从多个层面破坏电流互感器的正常工作条件,最终造成检测精度滑落。各类机制之间存在显著的关联与层叠效应,形成“放电产生—损害累积—特性恶化—精度滑落”的递进关联。深入领会这些影响机制,能够为电流互感器的状态监测与故障诊断提供关键理论依据:在实际应用当中,可通过监测局部放电信号的强度、频率等特征,预先判断检测精度的滑落趋向;同时,针对各类影响机制,采取优化绝缘构造、抑制电场集中、强化铁芯散热等举措,延缓局部放电的演进,保障电流互感器的检测精度与运行可靠性。未来研究可进一步聚焦局部放电与检测精度滑落之间的定量关联,为精确评估设备性能提供更有力的支撑。

参考文献

- [1] 李继方,周一帆,周星耀,韩爱山. 变压器油间气泡局部放电对绝缘性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (17): 7159-7167.
- [2] 彭勇,张利,汤会增,王榕泰,李鹏洋,刘岳,王会琳. 局部放电对GIS盆式绝缘子绝缘劣化程度的评估研究[J]. 内蒙古电力技术, 2023, 41 (02): 37-44.
- [3] 庄俊,余豪杰,殷实,李官军. 局部放电对SiC MOSFET控制单元影响研究[J]. 电力电子技术, 2022, 56 (08): 137-140.
- [4] 姜富修,丁永生,杜丽. 局部放电对配电开关的影响及应对措施[J]. 江苏科技信息, 2020, 37 (04): 45-48.
- [5] 万志强,曹鹏刚,宋建成,雷志鹏. 矿用隔爆型干式变压器绕组局部放电对温升的影响[J]. 工矿自动化, 2018, 44 (05): 36-41.