

发电厂厂用变压器抗短路能力评估与结构优化设计

田瑞涛

汕头华电发电有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i4.15072

[摘要] 发电厂厂用变压器是保障厂内各类设备安全稳定运行的重要电力装备,其抗短路能力直接影响整个电站的运行可靠性。随着发电机容量的提升和系统对变压器稳定性要求的增强,厂用变压器在面对短路冲击时的电动机械稳定性问题日益突出。本文从变压器抗短路能力的理论基础出发,结合实际运行案例进行评估分析,进一步提出结构优化设计思路与具体措施,为电厂设备升级与新建工程提供技术参考。

[关键词] 厂用变压器; 抗短路能力; 电动稳定性; 结构优化; 电磁力

中图分类号: TM41 **文献标识码:** A

Evaluation of Short-Circuit Resistance and Structural Optimization Design of Transformers Used in Power Plants

Ruitao Tian

Shantou Huadian Power Generation Co., Ltd

[Abstract] The power plant transformer is a critical electrical equipment that ensures the safe and stable operation of various devices within the plant. Its short-circuit resistance directly affects the operational reliability of the entire power station. As generator capacity increases and system requirements for transformer stability become more stringent, the issue of mechanical stability during short-circuit impacts on power plant transformers has become increasingly prominent. This paper starts from the theoretical foundation of transformer short-circuit resistance, evaluates and analyzes it through practical operational cases, and further proposes structural optimization design ideas and specific measures to provide technical references for equipment upgrades and new construction projects in power plants.

[Key words] plant transformer; short circuit resistance; electric stability; structural optimization; electromagnetic force

引言

在现代发电厂运行系统这个环境中,厂用变压器担当着从高压侧为厂内输送各级辅助用电的关键任务,直接关联着电厂生产及控制系统的不间断运行。因其需在高负载、高电流状态下长期运行,若发生短路故障,会面临巨大的电磁冲击,对其抗短路能力的要求进一步提高。尤其在系统短路电流水平呈不断提升态势的背景中,传统设计方法面对电动稳定性问题已暴露出不足,急需运用科学评估方式和结构优化途径提升其可靠性及安全性。本文围绕抗短路能力评估方法、关键影响因素及结构优化设计三个要点进行系统考察。

1 厂用变压器抗短路能力的评估方法与理论基础

1.1 抗短路能力的定义及评估意义

变压器的抗短路能力是评估其在电力系统发生短路故障时,能否承受剧烈的电动力冲击而不产生永久性机械变形或绝缘失

效的重要性能指标。由于电流急剧上升,将在变压器绕组及其结构上产生庞大的电动力。若设计或者制造的方式不合理,又或者材料强度欠佳,容易引起绕组移位、支撑结构的破坏,甚至能引发绝缘的击穿,极大影响到设备安全以及电网运行的稳定性。

在设备机械强度设计过程中,抗短路能力的评估占据着至关重要的地位,其直接关系到变压器的运行寿命与可靠性。采用科学的评估方式,可找出暗藏的薄弱环节,推动制造企业去优化设计结构,提高设备的整体质量层次^[1]。运行单位可依据评估结果制定合理的运行维护与监测策略,坚实构筑事故预防机制。

1.2 电动力效应的基本计算模型

短路电流产生的电磁力是变压器绕组设计与运行中至关重要的参数,对绕组的机械稳定性有直接影响。变压器在发生短路故障时,绕组内会出现极大的对称短路电流,这些电流产生的电

磁力会导致绕组受到强烈的机械冲击和变形,甚至可能引发绝缘破坏,影响变压器的安全运行和使用寿命。

电磁力的大小可以通过公式计算得出:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}$$

其中, I_1 和 I_2 分别为两绕组的电流, d 是绕组间的距离, l 为绕组的有效长度, μ_0 为真空磁导率。该公式表明,电磁力与绕组电流的乘积成正比,与绕组间距成反比,与绕组长度成正比。因此,在设计绕组时,应合理安排绕组的间距和结构尺寸,减少电磁力对绕组的冲击。

为实现绕组稳定的要求,评估时需顾及最大对称短路电流条件下电动力的效应,与结构强度计算相结合开展综合分析与验证。采用模拟短路工况下电磁力作用的方式,对绕组结构以及机械加固措施做合理优化,使变压器在短路故障期间依然拥有良好的机械强度及稳定性,由此提升设备整体的安全可靠性能。

1.3 热稳定与电动稳定的关系

若电力系统中出现短路电流,极短时间内就会产生强大的电磁冲击力,还会引起短时间的快速温度上升,此类温升会对变压器的绝缘系统造成极大威胁。尤其绕组与内部连接点的那些绝缘材料,若长时间或频繁遭高温侵扰,可能出现老化、碳化乃至绝缘击穿现象,对设备的运行安全及使用寿命造成重大影响。

基于这一基础,作为评估指标,变压器热稳定能力关乎其绝缘系统在短路状态下承受热冲击的能力。在同一时间点,电动稳定能力主要检验变压器可否承受由短路电流引发的剧烈机械力冲击^[2]。绕组及其支撑结构被这些电动力施加作用,容易引发机械位移、绕组发生变形或支撑出现松动等现象。评估变压器抗短路能力,热稳定和电动稳定二者皆不可少,它们彼此配合、形成互补态势,分析时要协同思索,进而全面体现设备在短路工况下的承载能力和可靠水平,为变压器设计优化与运行维护的开展提供科学支撑。

2 影响厂用变压器抗短路能力的关键因素

2.1 绕组结构参数

抗电动力能力受变压器绕组结构类型及其构造参数的直接而深远影响,如层式、饼式等属于常见的绕组类型。面对短路电流冲击,不同结构的机械强度表现有着明显的差异。层式绕组由于自身连续性颇强,一般适配中小容量变压器;而饼式绕组凭借良好的散热性能与电动力分布上的优势,多被应用于大中型变压器中。

绕组的排列方式、匝间间距以及轴向与径向压紧力的设计,还有夹件、支撑结构的强度水平,均为决定其抵御电动力能力的关键参数。在短路故障出现的时,电流在绕组中会产生强大的电磁力,尤其是短路电流聚集的区域中,匝间电动力出现明显增大,很可能造成局部结构受力分布不均,由此造成绕组鼓胀、变形或位置错动等现象。若绕组发生机械方面的形变,还会对绝缘间隙的均匀性造成干扰,可能引起局部放电,进而出现绝缘击穿现象,

由此极大降低变压器整体结构稳定性以及运行可靠性。在设计及制造的过程中,需综合顾及以上参数,采用增强结构强度并实现合理力学分布的技术手段,提升绕组系统应对极端电磁冲击的抗变形水平。

2.2 材料选型与制造工艺

绕组导体材质的甄选,对电机或变压器的性能起着举足轻重的作用。由于铜导体有着优良的导电性与机械强度,频繁被用在高性能设备中。凭借轻质及成本优势,铝导体适合某些特定的场合,导体材质对设备的电气性能存在影响,还关乎它的热传导有效程度,因而直接关乎整体的耐热性以及运行稳定性。

保证设备长期可靠运行,绝缘材料的耐热等级同样是关键要素。在高温环境下,高耐热等级的绝缘材料可让电气绝缘性能和机械强度维持良好水准,杜绝绝缘老化和击穿的情况^[3]。结合设计为高强度、高刚度的绝缘支撑结构,可显著增强设备在短路等异常工况时抵御机械冲击的能力,增强整体结构的刚性水平,保障设备运行既安全又稳定。压紧装置和浸漆固化工艺,对绕组结构整体刚度和耐热性能的提升也很关键,合适压紧装置让绕组的间隙最小,增强绕组的机械稳固性;高质量的浸漆固化工艺可有效强化绝缘系统的结合力,增强绕组的抗振及耐热性能水平,由此延长设备的运转寿命。

2.3 夹紧力与预紧结构设计

在变压器的制造期间,施加足够的轴向、径向夹紧力,是增强绕组抗短路能力的关键办法之一。短路故障出现的瞬间,绕组面临剧烈电动力的冲击考验,若夹紧力未达要求,绕组可能会出现振动、位移,甚至造成变形,进而引起绝缘受损或机械结构稳定性被破坏等严重后果。通过合理地调控夹紧力,可对绕组的动态变形进行有效限制,增加其整体机械刚性以及结构稳定性。

为达成可靠而稳定的夹紧力,制造过程中一般采用多种预紧装置,如波纹弹簧、压紧垫块和拉杆系统这类。在运行过程中,这些部件持续施加合适的压力,抑制温度变动、材料老化引起的松弛效应。由于波纹弹簧力值可控、弹性十分稳定,频繁用于轴向预紧系统处;垫块材料的甄选、尺寸的搭配及安装的方位,也直接对夹紧力传递效率和均匀性的达成有影响。预紧装置选型与配置是否契合要求,将直接影响变压器在遭受短路冲击时绕组结构能否稳定存续。制造企业在设计阶段需全面考量力学性能与长期运行状况,让夹紧系统展现出良好的持久性与可靠水平,为变压器的安全运行筑牢根基。

3 厂用变压器结构优化设计策略

3.1 绕组结构的优化设计

在高压电气设备当中,绕组结构受电磁力影响切不可忽视。在设备运转的期间内,因强电流的流通,会造就较大的电磁力量,若这种力分布失均,或汇集在某一局部范围,极易造成绕组变形、位置改变,乃至出现机械损伤,恰当优化绕组结构的设计,作为提升电气设备安全稳定性的关键途径之一。即便减少匝数会对电感及感应电压产生一定影响,但在保证电气性能契合需求的情况下,适当削减匝数可让每匝承受的电磁作用力减弱,减

轻整体机械受力的水平。加大匝间的支撑面积规模,使各匝相互之间形成更紧密的结合,不仅增进了绕组的整体刚性水平,还可有效把局部受力分散开,降低了电磁力于单匝处的集中水平,由此提升了绕组对抗瞬态冲击的能力。

阻尼层可借助吸收部分能量,对电磁力作用下产生的机械振动进行缓冲、分散,缓和瞬时力骤然增强造成的机械冲击^[4]。引入了结构阻尼层,既提升了绕组系统动态响应的效能,也增强了其于长期运行阶段的机械稳定性。合乎逻辑的结构布局设计,促使电磁力均匀地分布到整个绕组系统,也有利于阻止局部区域因受力过大产生膨胀变形现象。采用有限元分析等方式,在设计阶段可预测电磁力分布的状态,预先实施支撑位置与结构参数优化,杜绝局部应力集中过大导致绕组失稳,甚至引起损坏。

3.2 铁芯与夹件系统增强设计

在电力变压器及大型电气装置中,短路故障会引起巨大的电动力冲击,很容易对设备的内部结构造成损害。在高负载运行的时段或频繁有电流冲击时,结构在机械方面的稳定性意义重大,做好结构设计的优化、选取合理材料以及强化支撑部分,是促使设备安全运行的重要实施手段。高密度铁芯展现出更优的磁通导引效能,而且它质量方面更大,刚性方面更强,有利于削减运行时因电磁振动引起的机械干扰。与传统材料比起来,受电磁激励影响,高密度铁芯不太容易发生共振或结构抖动,进而提升整套设备运行的平稳程度。

为强化铁芯与绕组的机械稳固性,由此诞生了多点定位支撑的设计方案。该种支撑途径在关键位置设置多个固定点,把电磁力传递路径做合理分散,防止集中受力所引发的结构变形现象。多点支撑对组件之间连接强度的提升效果明显,也提升了整个结构系统面对冲击载荷的抵御力,尤其是在短路的突发故障出现时,可实现迅速缓冲与稳固定位之效。优化拉板结构同样是防范机械松动与滑移的关键所在。在强电动力作用下,传统拉板易出现局部变形以及连接点疲劳问题,采用改进拉板材质的方式,能显著增进其承载能力及抗疲劳性能。向拉板表面添加加固筋条,不但增强了它的刚性与抗弯能力,还在结构上构建起一种类似“加强筋网”的支撑体系。

3.3 数值仿真与试验验证技术

在电力设备的设计阶段,短路状态下产生的强电动力,对设备内部结构的稳定性提出了极高规格要求。为保障关键部件于极端工况中仍可维持优良的机械性能与电气安全性,在现代工程实践中,越来越多地引入仿真模拟与实物测试结合方式,用以提升结构设计的科学合理性与可靠程度。借助专业仿真软件,

如ANSYS、COMSOL等构建三维电磁-结构耦合模型,是解析短路条件下电动力分布的关键技术手段。运用软件构建起设备内部几何结构,涉及绕组、铁芯、拉板这些主要部件,进而赋予其相符的材料属性,可以精准地模拟短路电流激励条件下电磁场的分布面貌^[5]。仿真分析不仅可呈现电动力在空间的大小与方向,还可展现其对结构造成的变形倾向与应力集中范围。

仿真期间可对各类设计方案开展对比,如调整绕组的间距值、改变支撑结构的数量级、替换不同材料等,从而找出结构稳定性跟成本之间的最佳平衡点。针对高电流、大电压的设备而言,借助仿真分析还能实现热-力-电多物理场的耦合研究,充分掌握极端工况下设备的综合响应特点,为实际设计给予全方位的数据支撑。虽然仿真分析精度良好、效率迅速,但其准确性仍需借助实物测试予以验证。在优化设计完成的后续阶段,需把相应的原型机制出,采用高电流模拟装置进行短路试验检测,依托实验平台,能对实际运行中或许出现的短路情形进行模拟。经由施加瞬间强电流,留意设备结构在形变、位移和应力响应上的关键性能指标。

4 总结

作为发电厂内部电力系统关键构成的厂用变压器,其抗短路能力在保障全厂电力安全运行这件事上,有着不可忽视的意义。本文对影响变压器抗短路性能的主要因素开展了系统分析,又结合工程实操提出了多项结构优化手段,涵盖对绕组结构优化、增强铁芯夹件及仿真试验验证等手段。通过理论跟实践相契合,能有力强化变压器的短路承载能力及运行的可靠性,给大容量发电设备配套系统的设计提供理论支持及工程上的指引。

【参考文献】

- [1]朱宝昌.计算热老化程度的变压器绕组内线圈短路承受能力评估方法[J].电气技术与经济,2024(3):80-83.
- [2]靳铭凯,郭鹏鸿.磁场-结构场双向耦合作用对变压器绕组轴向振动过程的影响[J].高电压技术,2023,49(8):3296-3304.
- [3]程志明,姜良佳,杨涛.新能源变压器结构优化研究[J].通信电源技术,2024,41(18):52-54.
- [4]闫佳.电力主变压器近区连续短路故障分析及治理研究[J].数码设计,2023(21):140-142.
- [5]朱磊,金阳蕾.电力系统中的变压器抗短路措施应用[J].集成电路应用,2023,40(6):202-203.

作者简介:

田瑞涛(1994--),男,汉族,山西运城人,本科,助理工程师,研究方向:电气工程。