

电力变压器绕组的形变分析与对策

林鑫彤

(国网内蒙古东部电力有限公司通辽供电公司 内蒙古 通辽 028000)

[摘要] 电力变压器作为电网中最为关键的核心电力设备之一, 担负着重要的变电任务, 其安全、可靠的工作状态直接影响了整个电网的电能供应。随着当前世界形势的不断复杂变化和我国国民经济的高速健康发展, 现代社会对电力供应的安全可靠性性能的要求越来越高, 电力安全作为工业的主导地位比以往任何一个时候都更加重要。此外, 人民对于电量的需求也在与日俱增, 电力变压器也逐渐向着更高电压和功率的方向不断向前发展着。

[关键词] 变压器; 绕组变形; 形变分析; 对策

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-6288.2021.08.609

本文首先研究了电力变压器绕组在发生短路时形变的过程, 并从绕组结构变化、材料属性、励磁涌流三个方面对绕组形变的影响因素进行了分析, 最后, 研究了改善变压器绕组形变问题的一些对策, 以减小变压器在短路时绕组发生剧烈形变对设备本身以及电力系统所造成的危害。

1 变压器绕组形变过程

1.1 变压器漏磁场产生的原因

当电源加在变压器某一绕组上后, 变压器的铁磁材料内就会产生磁通, 它沿铁磁材料构成环路闭合, 同时与原、副绕组交链, 称为主磁通。主磁通是变压器进行一二次绕组之间进行能量传递的媒介, 其大小取决于励磁电压大小。

在负载电流通过绕组时, 会在绕组附近区域产生磁通。这种沿空气、油箱壁等非导磁媒质闭合磁通路径称为漏磁通。漏磁场的形成, 主要是由于铁磁性材料的磁导率过大, 相比空气的磁导率要大得多。漏磁通的大小主要取决于负载电流的安匝大小和漏磁路径, 而绕组上电磁力的大小又直接受到漏磁场的影响。因此, 要想分析计算电磁力的大小, 必须准确计算漏磁场的大小。

1.2 绕组电动力

当在电网中运行的变压器与负载连接后, 变压器绕组及其附近区域产生漏磁场, 漏磁场本身的分布情况非常复杂。为了便于研究, 通常把漏磁场简化成轴向漏磁场 B_y 与辐向漏磁场 B_x 。变压器的绕组在有电流通过时, 会在漏磁场中产生力的效果, 而这个力则被称为是绕组电磁力。由左手定则可知, 轴向漏磁产生的是辐向力 F_x , 辐向漏磁则产生轴向力 F_y 。由于变压器内的电流、磁场都是时变的, 则绕组上的电磁力也是时变的。

1.3 绕组应力的概念与形变产生

受到固定作用的物体不能发生位移, 若此时在外力作用下, 其几何形状和尺寸发生变化, 则将这种变化称为应变。材料发生形变时内部产生了大小相等但方向相反的反作用力抵抗外力, 定义单位面积上的这种反作用力为应力。当物体受到外部因素(气压变化等)而变形时, 在物体各部分之间将产生相互作用的内力, 以抵抗外部因素所带来的扰动, 并力图使物体从变形后的位置回复到变形前的位置。在所考察的截面某一点单位面积上的内力称为应力。根据应力方向的不同, 物理上可以将应力分为正应力和切应力, 正应力的方向与应变方向平行, 而切应力的方向则与应变垂直。

当变压器突发短路时, 内、外绕组会受到数值巨大的辐向和轴向的电磁力, 轴向电磁力作用在绕组上, 表现为轴向的拉力或者压力, 从而使得绕组会发生上下震动。对于辐向电磁力, 外绕组上的辐向电磁力沿径向指向外, 使外绕组上的导线受到环向拉伸应力; 内绕组受到的辐向力沿径向指向铁芯, 由于撑条的存在, 内绕组并不会发生均匀压缩变形, 这使内绕组上的导线在局部发生弯曲变形, 内绕组上的导线会受到环向压缩应力和弯曲应力的作用。在短路电磁力作用下, 当绕组上导线弯曲应力与压缩或者拉伸应力的合应力超过导线材料的屈服强度时, 绕组导线就会在导线所在平面内发生辐向或轴向形变。

2 变压器绕组形变因素的分析

(1) 绕组结构的变化^[2]。

变压器绕组结构的变化, 也将引起电磁力大小及分布规律的变化, 其中轴向结构的变化对其影响最大。一般在电磁力作用下, 结构的平衡是不稳定的, 为使结构的平衡保持稳定, 则必须增加额外的约束。因此在变压器设计时, 为保证变压器高、低压绕组的轴向稳定性, 绕组上必须施加足够的预紧力。当变压器绕组有轴向位移时, 其高、低压绕组各对应分区中的安匝不再平衡, 并且上、下也不对称, 此时将在变压器高、低压绕组中产生巨大的轴向电磁力, 此轴向电磁力在高、低压绕组中的方向是相反的。方向相反的轴向电磁力将使绕组的这种不平衡进一步扩大, 直到绕组损坏。

(2) 绕组材料属性。

绕组的材料属性往往会直接影响形变情况, 同时温度对材料属性的影响较大, 在实际变压器绕组上, 温度分布是不均匀的, 这就导致绕组高度范围内各位置的材料属性并不相同, 因此导致了绕组各处的强度不能以相同的标准衡量; 同时变压器在长期服役期间, 在每次经过短路电流冲击后, 绕组导线都会产生一定程度的弹性应变和微小的塑性应变, 当长期积累后产生的累积效应就可能造成绕组的形变。

(3) 励磁涌流的冲击。

在变压器由空载条件投入或者外部故障消除后重合闸时, 绕组中也会产生较大的瞬态电流, 从而在绕组上产生很大的电磁力, 给绕组造成影响甚至发生形变。同时, 励磁涌流产生的绕组轴向电磁力总是要大于短路电流引起的轴向电磁力, 轴向力越大, 就越容易在绕组上产生轴向位移。轴向位移势必会加剧安匝不平衡, 从而使绕组发生形变破坏。

3 防止变压器绕组形变的对策

3.1 限制故障时的短路电流

3.1.1 装设限流电抗器

串联限流电抗器可以提高支路的计算阻抗，限制短路电流。这种办法常用于发电厂和变电站10kV及以下配电装置中的电缆馈线上。电抗器按其结构可分为普通电抗器和分裂电抗器。三个单相空心线圈即构成了简单的普通电抗器，线圈的空心结构可以防止短路时电抗器饱和而降低限流的作用。普通电抗器按其安装位置和功能，可被分为母线电抗器和线路电抗器。母线电抗器安装在单母线分段接线或双母线分段接线的分段处，普通电抗器则被安装在电缆出线回路中。分裂电抗器则具有正常运行时阻抗小，短路时通过电抗器的阻抗大的优点。架空线路由于阻抗值大，故无需进一步串联电抗器。

3.1.2 采用低压分裂绕组变压器

分裂绕组变压器是指其中一个绕组分裂为两个绕组的双绕组变压器，因此低压分裂绕组变即指的是低压分裂成双。这两个低压分裂绕组在额定电压、额定功率以及匝数上都是完全相同的。绕组内的铁芯布置有以下两大特点：一是低压分裂绕组间短路阻抗较正常运行时大；二是各分裂绕组与高压绕组之间的短路阻抗较正常运行时小。从而使得分裂绕组变压器同样具有正常运行时阻抗小，短路时通过电抗器的阻抗大的优点。这样一来，在未发生短路时变压器回路的电能损失可以进一步减小，而在短路时由于流经短路电流的回路阻抗较大可以很好地完成限流的目的。因此，厂用变压器以及带两台较小容量发电机的单元接线一般都建议采用低压分裂绕组变压器来限制短路电流。

3.1.3 采用合适的电气主接线形式和运行方式

主接线与运行方式直接影响短路电流的流经支路与回路中计算阻抗的大小，从而决定短路电流的大小。为此，可以通过优化设计电气主接线形式和运行方式来降低短路时短路电流的大小。例如，大容量发电机采用单元接线而非带有母线的接线形式，以减少突然短路时短路电流能流过的支路数；变压器分列运行而非并列运行也能取消短路时来自另一回路变压器的短路电流；出线回路采用单回运行而非双回运行，使得短路时计算阻抗增加一倍；环形供电网络开环运行；等等。值得注意的是，主接线形式的设计不能只考虑限制短路电流，而应综合考虑可靠性、灵活性、经济性及其对电网的稳定性影响。

3.2 加强对变压器短路能力的试验研究

短路试验能够在运行前对变压器的抗短路能力作出准确的判断与验证，从而防患于未然。运行中的变压器发生短路时，往往被忽视，由于缺乏及时的检查保护，工作人员未及时拧紧松动的夹紧装置，变压器绕组承受短时多次的短路电流后将完全损坏。或者在多次短路后绝缘缺陷被暴露出来，绕组在过电压、过电流的共同作用下烧毁。许多变压器绕组形变事故常被误认为是绝缘强度不过关，实际上却是机械强度的问题。

为此，上级部门首先重视短路试验的必要性和严谨性，认真制定标准并采取措施，将短路试验成功落实。其次，企业要

加强开展变压器的状态检修，定期进行变压器的预防性试验和变压器油色谱分析，一旦发现异常应缩短检测周期。变压器受到短路冲击后，应及时对绕组进行有效的试验，如绕组电容阻抗值、绝缘油的色谱分析、绕组频响曲线等进行全面综合的考究，判断变压器绕组是否已经形成变形故障，一定从事故前就做好充分的先验准备，避免重大事故种子的萌发。

3.3 正确选择绕组的压紧力

变压器绕组能否耐受短路时电动力的冲击，与压紧装置的机械强度、绝缘加工质量和绕组绕制方式等因素有着密切的关系，除此之外，绕组的压紧力也扮演着重要的角色。实际上，绕组在对抗短路电动力冲击时，起主要作用的有两个因素：一是绕组材料本身的物理机械特性，如线圈的抗压、抗扭、抗拉伸的能力；二是绕组在压紧之后，俄段与张条、端圈等由于相间摩擦力而紧密结合的程度。若装置的压紧力选取过小，线段与整块的间隙偏大，在短路时轴向电动力造成线段的位移或扭斜甚至被拉断，最终也让导线的外绝缘破损而导致变压器损坏。而当绕组的压紧力也选择过大，超出压紧装置的安全允许范围，压紧结构也会发生受压变形，从而降低短路时对抗冲击力的能力。由此可见，在留有一定安全裕度的前提下，应尽可能选用高强度压紧材料并提高压紧装置间的压紧力，从而更好地对抗短路冲击力。

4 结语

本文对变压器绕组在短路电流冲击下，绕组所受电磁力、结构应力展开了研究。介绍了应力的概念以及变压器漏磁场的产生机理，从绕组结构变化、材料属性、励磁涌流三个方面对绕组形变的影响因素进行了分析：结构变化主要会导致电磁力分布发生变化；励磁涌流引起的轴向电磁力较短路电流引起的电磁力大，存在使绕组发生形变的危险；最后研究了改善变压器绕组形变问题的一些对策，以减小变压器在短路时绕组发生剧烈形变对设备本身及电力系统所造成的危害。

对于绕组上的结构力分析还需要更深入地研究，在“磁——结构”耦合相关方面进行分析；以往的研究都将绕组中温度分布视为均匀的，但实际变压器中的温度分布并不均匀，而温度往往会影响绕组材料的物性参数，这些物性参数是计算结构力的关键，因此考虑温度分布不均这一因素对于研究变压器绕组变形的问题是很有必要的，也是以后工作研究的重点。

参考文献

- [1]熊汉武,张书琦,赵志刚,梁宁川,王琳,徐征宇.电力变压器绕组幅向弯曲应力分析方法[J].高电压技术,2020,46(03):931-938.
- [2]王璋奇,王孟.电力变压器绕组轴向振动稳定性分析[J].中国电机工程学报,2002(07):24-28.
- [3]姜山.电力变压器绕组变形的受力分析[D].华北电力大学,2012.
- [4]陈晓宏.110kV变压器绕组故障分析及对策[J].冶金动力,2015,187(9):1-2.