

电力变压器抗短路能力校核与治理

随着电力系统规模的不断扩大, 电力系统短路电流水平逐年增大, 超高压大电网互联对大型电力变压器所能承受的短路电流水平提出了更高的要求。在某些重要场合, 过高的短路电流已经成为电力系统安全稳定运行的重要障碍, 采取限制短路电流的措施已经成为必须。通过对电力变压器抗短路的综述和介绍, 结合电力变压器状态检修的实际需要, 分析了提高变压器抗短路能力的方法。

张秀斌¹ 温定筠¹ 屈传宁² 王 津¹ 李 明³ / 1. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院 2. 国网甘肃省电力公司检修公司 3. 山东电力设备有限公司



张秀斌/工程师

近年来, 我国电力装机容量突飞猛进, 在运行的大型电力变压器的数量成倍增加, 作为电网的核心设备, 电力变压器的稳定、可靠运行对电力系统安全具有重要的意义。电网内变压器等主要设备的短路电流耐受能力决定着电网的安全运行水平, 在电网短路事故的冲击下, 强大的短路电流会导致绕组过热, 从而烧毁绝缘。另一方面, 巨大的电动力会造成绕组变形, 继而引发匝间、饼间短路, 甚至造成更大的事故。对电力变压器进行抗短路能力校核, 验证其动稳定及热稳定性能, 并根据校核结果对抗短路能力不足的设备进行针对性的治理, 对安全生产和有序供电具有重要意义。

关键词/Keywords

电力变压器 ·
短路电流 ·
抗短路能力 ·
校核 ·

变压器短路故障及计算

1. 变压器短路故障及危害

变压器短路故障分为变压器出口短路、内部引线或绕组间对地短路以及相与相之间短路等。

电力变压器发生出口短路时, 变压器受到短路电流冲击, 轻者造成绕组变形, 严重者绕组明显变形, 绝缘受到一

定程度破坏, 特别严重者变压器绕组严重变形, 绕组烧毁, 绝缘击穿, 甚至引起爆炸起火, 彻底烧毁变压器。短路电动力和机械力的作用, 使绕组产生严重不可逆变形, 绕组尺寸和形状均发生重大变化。电动力造成的绕组鼓包、位移以及匝间短路导致绕组力学性能下降和绝缘距离发生变化, 若再次遭受短路电流冲击, 在巨大的冲击点动力下, 变压器将发生损坏事故。持续运行积累将使变压器绕组进一步变形, 直至量的积累导致质的变化。变压器绕组变形实例如下图所示。



图 变压器绕组变形实例

2. 短路电流、短路力和短路应力

变压器发生短路时, 短路力的计算公式为

$$F = B I_s M_T N \times \frac{1}{9.81} \quad (1)$$

式中, B 为漏磁通密度; I_s 为短路电流; M_T 为平均匝长; N 为匝数。

短路电流计算公式为

$$I_s = 2.55 I \frac{100}{\%Z} \quad (2)$$

式中, I 为额定电流; $\%Z$ 变压器短路阻抗; 2.55 为考虑非周期分量的瞬态短路电

流系数。

空间磁通密度的计算公式为

$$B = 4\pi \times 10^{-7} \frac{NI_s}{qO_w} \quad (3)$$

式中, O_w 为此路长度; q 为变压器的HL组数。

导体应力计算公式为

$$\sigma = \frac{FL^2 \times 10^{-4}}{4N_b(n_l)^x M_1 b t^2} \quad (4)$$

式中, n_b 为导体层数; L 为线圈导体支持间隔; n_l 为导体并列数; b 为导体宽度; t 为导体厚度; x 为系数。

3. 影响变压器短路电流的因素

当变电站母线或出现近区发生短路故障时, 变压器短路电流与该变压器参数、故障时系统运行方式等诸多因素有关。变电站母线短路时, 最为重要的参数是影响系统短路故障时流过变压器绕组的短路电流水平的主要因素。在变压器的参数和并联数量一定情况下, 变电站高压及中压侧短路电流间存在一定的相互约束关系。

中压侧母线电流一定时, 高压侧发生母线短路故障, 变压器短路电流将随高压侧母线短路电流的增大而减小, 随着高中压母线短路电流的增大, 高压母线短路电流的影响将逐渐减小, 此时变压器短路电流主要受中压侧母线短路电流的影响, 随着中压母线短路电流的增大而显著增大。

当高压母线短路电流一定时, 中压母线发生短路时, 流过变压器的短路电流随着中压侧母线短路电流的增大而略有减小。

低压侧发生短路时, 变压器短路电流主要受中压侧母线短路电流水平的影响, 中压侧母线短路电流水平一定时, 低压侧发生短路时变压器绕组中的电流值随高压侧母线短路电流增大而略有减小。

事实上, 流过变压器的短路电流水平主要取决于高压侧的母线短路电流, 高压侧母线短路电流越大, 则中压侧母线发生短路时流过变压器的短路电流越大。

变压器抗短路能力校核

变压器短路故障在绕组中引起的电流称作“过电流”, 在变压器及其组件和附件的设计制

造中, 应保证在一定条件下承受外部短路的热稳定和动稳定效应而无损伤。变压器的抗短路能力校核方法主要分为高压电气试验法和计算法。

使用专用计算软件对变压器的抗短路能力进行校核, 可以在设计角度反映其抗短路能力的强弱。

1. 变压器短路试验抽检

突发短路试验对于变压器抗短路能力抽检中具有良好的表现, 对变压器开展电力变压器短路承受能力校核和抽检工作中, 采用包括短路耐受电压试验在内的相关抽检试验, 可以对变压器抗短路能力进行有效校核, 发现问题并及早采取整改措施。

通过突发短路试验, 根据短路试验的结果及短路试验期间的测量和检查, 可以发现可能的故障迹象, 若试验完成后, 以欧姆表示的每相短路电抗值与原始值之差大于1%, 则被测试变压器的抗短路能力值得商榷。

2. 变压器抗短路计算方法验证

有限元法为变压器抗短路能力计算提供了数值计算方法, 采用有限元法是从宏观电磁场角度分析变压器的抗短路能力, 即

$$\begin{cases} \nabla E = \frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla D = \rho \\ \nabla B = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, H 为磁场强度矢量, A/m; B 为磁通密度矢量, Gs; E 为电场强度矢量, V/m; D 为电位移矢量, C/m²; J 为电流密度矢量, A/m²; ρ 为自由电荷体密度, C/m³。

把矢量函数变成矢量代数运算, 直角坐标系中,

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k$$

变压器中的电磁场由下面的微分方程决定

$$\nabla \frac{1}{\mu} \nabla A = J_e - j\omega\sigma A + \omega^2 A \quad (6)$$

式中, μ 为磁导率, H/m; A 为矢量磁位, Wb/m; J_e 为源电流密度, A/m²; σ 为电导率, S/m; ω 为电源频率, Hz; $-j\omega\sigma A$ 为感应电流密度, A/m²;

$\omega^2 A$ 为位移电流密度, A/m^2 。

采用有限元法计算变压器抗短路能力按照以下步骤进行: ①建立有限元模型。②定义材料属性及其绕组实常数。③将单元属性和材料特性赋值给试验模型并进行网格划分。④建立电路模型。⑤耦合有限元模型的自由度进行瞬态分析求解。

计算中, 未知量主要是磁位和磁通, 继而可以由这两个自由度导出其他物理量。

提高变压器抗短路能力措施

1. 对老变压器安排技术改造

对老变压器进行技术改造, 对变压器铁心的牢固方式进行强化, 低压绕组导线在规格的选取及绕组方式上进行改进。选取符合规格的导线, 在进行导线绕组的时候防止导线扭曲变形; 保证三相线圈的相位位置充分压紧, 防止短路变形。

2. 完善变压器绕组变形试验

变压器绕组变形试验, 对于发现变压器绕组缺陷具有重要的意义, 对新投变压器进行绕组变形试验, 取得其初始绕组频率响应数据, 并定期开展绕组变形试验, 对于开展变压器绕组状态评价及检修计划安排具有十分重要的参考意义。

在检修周期内, 建立健全变压器绕组变形数据库, 提高绕组变形试验水平, 提高判断准确度。开展未做绕组变形测试的变压器排查与测试工作, 保留测试数据。完善的数据库将有利于正确的状态水平评价与检修计划安排。

当变压器遭受出口短路冲击时, 绕组变形数据库中所以储存的基础数据可以与事故后测试数据进行比对, 从而判断变压器变形程度, 根据比对结果, 可以对变压器能否继续运行作出评价。对未发生明显绕组变形的变压器, 及时投入运行, 不仅可以节省大量人力、物力与财力, 还能缩短检修周期, 提高状态检修水平。

对于运行年久、温升过高或长期过载的变压器, 应在绕组变形的时候同时进行变压器油色谱分析, 以确定绝缘老化程度, 必要时进行进一步绝缘老化鉴定。

3. 加强新变压器的选型和监造工作

设备选型中, 严格遵循有关选型标准和原则, 严格按照招标技术文件的要求, 选用成熟、可靠的变压器厂家的产品, 杜绝抗短路冲击能力差的变压器投入电网运行。

对设备选型时, 应充分考虑现有设备结构状况, 取消冗余功能, 选择可靠结构, 在充分考虑电网的短路容量与设备的动稳定性能之后, 再确定设备参数, 根据电网实际需求合理配置分接开关, 对性能参数的要求应和目前制造水平及材质状况相适应。

设备选型时, 优先选用经过突发短路型式试验合格的设备, 必要时对设备进行抽检短路耐受试验。

优先选用采用先进设计的设备, 当先进性与设备的可靠性有矛盾时, 首先考虑可靠性。充分考虑工艺和材质的分散性, 在关键部位应留有足够的裕度, 设计时按照高温条件进行抗短路能力的设计。对特殊部位(如换位、螺旋口)要进行抗短路能力校核计算。优先采用独立调压绕组结构。尽量采用半硬以上的自粘型换位导线和组合导线; 轴向压紧亦采用弹簧压钉, 采用高密度整体垫块。

从根本讲, 提高变压器抗短路能力, 应当全面系统研究变压器的抗短路能力, 针对电网实际情况, 从设备制造阶段就介入考虑变压器抗短路能力, 严格进行设备监造技术监督, 杜绝抗短路能力不足的设备进入电网。

4. 加强设备运行管理工作

在设备运行阶段, 提高运维检修水平, 改善变压器运行环境, 避免近区短路事故的发生, 从而减少变压器短路事故, 提高电网运行可靠性。

运维人员应加强变压器的检查和维护保修管理工作, 应根据变压器的运行状况结合大修对有隐患的变压器进行吊罩检查, 保证变压器处于良好的运行状况, 并采取相应措施, 降低出口和近区短路故障的几率。

变电所要配备可靠且完善的保护装置, 确保变压器发生故障时继电保护和开关能正确动作。

应尽量对因短路跳闸和遭受短路冲击的变压器进行试验检查,以有效避免重大事故的发生。

5. 加强用户侧管理

为尽量避免系统的短路故障,应针对近年来由于用户侧设备故障造成变压器遭受冲击事故的情况,对专线用户进行全面的清查治理,要尽量减少因用户故障而造成主设备事故的发生。

加强对用户设备的审查,要求用户配备可靠动作的保护装置,在事故发生时,能迅速切除故障,避免事故进一步扩大。同时,加强对用户设备的监督管理,要求用户按电力行业的相关规定,积极认真地由具有相关资质的单位进行每年一次的保护定检和设备预防性试验工作。

结束语

随着电网规模的不断扩大,变压器等主要设备的短路电流耐受能力对电网的安全运行水平越来越起决定性因素。提高变压器抗短路能力,对于电力设备状态评价和状态检修具有迫切的现实意义。

变压器抗短路能力的校核有高压试验法和计算法,通过变压器突发短路试验,能够有效发现变压器短路缺陷,为采取进一步措施提供参考依据,电磁计算方法分析变压器抗短路能力,从设

计阶段杜绝不符合抗短路要求的设计,两者结合有助于进一步提高抗短路能力校核水平。

通过对老旧设备安排技改大修,完善变压器绕组变形试验,建立绕组变形数据库,加强新变压器选型和监造,加强设备运行管理和加强用户侧管理等措施,能够有效提高在运变压器应对突发短路的能力。

总之,提高变压器抗短路能力,定期开展在运变压器抗短路能力评价,适时安排状态检修,及时采取措施消除隐患,对于提高在运变压器可靠性,保障电网安全稳定运行具有重要的现实意义和良好的经济利益。

参考文献

- [1] 王志勇. 防止变压器近区短路和提高变压器抗短路能力[J]. 中国科技信息, 2009 (2) .
- [2] 刘新宇. 电力变压器抗短路分析[J]. 新疆电力技术, 2007, 94 (3) .
- [3] 王欣伟, 连建华, 俞华, 等. 电力变压器内绕组辐向抗短路能力的计算与分析[J]. 变压器, 2013, 50 (1) .
- [4] 邢海瀛, 刘少宇, 马继先, 等. 变压器抗短路能力核算与治理[J]. 中国电力, 2012, 45 (5) .

(收稿日期: 2014-06-30) EA

(上接第76页)

参考文献

- [1] 李静, 程小华. 永磁同步电机发展趋势[J]. 防爆电机, 2009 (5) : 1-4.
- [2] 李耀华, 刘卫国. 永磁同步电机矢量控制与直接转矩控制比较研究[J]. 电气传动, 2010 (10) : 9-12.
- [3] 张强, 任一峰, 林都, 等. 空间矢量脉宽调制算法(SVPWM)的原理及仿真研究[J]. 电气技术, 2010 (6) : 35-37.
- [4] Sanbo P, Junmin P, Zuohua T. A shifted SVPWM method to control DC-Link resonant inverters and its FPGA realization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (9) : 3383-3391.
- [5] 檀盼龙. 基于DSP的永磁同步电机驱动器研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
- [6] 杨金星. 基于DSP的永磁同步电机控制系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [7] 吴茂刚, 赵荣祥, 汤新舟. 空间矢量PWM逆变器死区效应分析与补偿方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006 (3) : 469-473.
- [8] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 251-289.

(收稿日期: 2014-07-14) EA