

高阻抗电力变压器涌流特性及其对保护影响的研究

尹项根¹, 曹文斌¹, 潘远林¹, 王育学², 郭乾^{1,2}, 刘玮²

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;

2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600)

摘要: 高阻抗变压器以其限制短路电流的优势已得到广泛应用。其中高压绕组内置型高阻抗变压器涌流问题将比普通变压器更为突出。近几年, 电网中多次出现这类变压器投运时邻近设备的后备保护误动事件。从绕组结构入手, 明确了变压器磁通分布和等值电路参数的对应关系。根据变压器零模涌流解析表达式和几种变压器自互漏感参数的差异, 指出内置变涌流幅值更大衰减更快的特征并得到了仿真的验证, 揭示了零模涌流导致保护误动的原因。对后续改进仿真和试验的平台、深化研究的方向进行了展望。

关键词: 高阻抗变压器; 高压绕组内置型; 低压绕组串联型; 涌流; 后备保护

Inrush current characteristic of high-impedance transformers and its impact on protective relays

YIN Xianggen¹, CAO Wenbin¹, PAN Yuanlin¹, WANG Yuxue², GUO Qian^{1,2}, LIU Wei²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: High-impedance transformers have been widely used for their advantages of limiting short-circuit current. The inrush current problem of the high-voltage built-in high-impedance transformer (T-Hin) will be more prominent than the traditional transformer. In recent years, there have been many misoperations of the backup protection of the transformer and its adjacent equipment. From the perspective of the winding structure, the correspondence between the magnetic flux distribution and the parameters of the transformer equivalent circuit is clarified. According to the analytical expression of zero-mode inrush current and the difference of the leakage inductance parameters of several transformers, it is pointed out that the T-Hin inrush current amplitude is larger and attenuation is slower, which is verified by simulation. The causes of protection misoperation caused by zero-mode inrush current are obtained. And the future improvement of simulation and experimental platforms, and the direction of deepening research are prospected.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20162461).

Key words: high-impedance power transformers; high-voltage winding built-in; low-voltage winding series reactance; inrush current; backup protection

0 引言

随着电网容量增加^[1], 连接配电网的变压器低压短路电流严重超标。传统做法是在变压器低压出线或线路上串联电抗器以限制短路电流, 这需要增加一次设备。高阻抗变压器可在不增加一次设备的

情况下, 增大短路阻抗和降低短路电流, 还有可能降低空载损耗, 已得到越来越多的应用^[2]。

目前, 比较常用的高阻抗变压器实现方式有两种: 第一种是采用高压绕组内置方式, 这种变压器将高压绕组放在最里侧, 离铁芯最近, 通过增大高低(及中低)压绕组间的主空道来增大高低(中低)压侧漏抗; 第二种是在低压侧串联限流电抗器的方式, 将限流电抗器串接到三角绕组内部。相对于普通变压器(下简称普通变 T-Tra), 这两种高阻抗变压

器改变了绕组排列结构,可能会使涌流特性(幅值大小及衰减特性)发生变化。励磁涌流以及由其引起的暂态零序电流将会发生变化,影响差动保护以及零序保护动作性能,给现有保护带来挑战。

实际上,近几年电网中多次出现高压绕组内置型高阻抗变压器投运时,引起变压器甚至是其上一级线路零序过流保护误动的情况^[3-4],严重危及电网的运行安全。通过录波分析,高压绕组内置型高阻抗变压器(下简称内置变 T-Hin)空投时三相涌流呈现较大不平衡特征,涌流的零模分量初始值较大,到达零序过流保护整定时延时仍大于整定值,这是导致零序过流保护误动的直接原因。因此,迫切需要进行进一步认识和研究高阻抗变压器涌流特性及其对保护的影响。

对于高阻抗变压器涌流特性的研究,文献[4]中采用解析法,研究了低压侧串联限流电抗器高阻抗变压器(下简称串抗变 T-Lse)的涌流特点,并与普通变压器做了比较。而对于不同结构特点,串并联方式的高阻抗变压器励磁涌流与和应涌流的变化机理及其衰减特性还没有相关文献做专门的分析与研究。

在普通变压器的研究中,国内外的相关学者和专家们对励磁涌流的产生机理开展了长期的研究工作^[5-11],并提出了许多防止空投期间变压器及其相邻元件保护误动作的方法^[12-14]。譬如二次谐波制动法、间断角鉴别法等,尚需要分析这些方法在高阻抗变压器中的应用拟或改进问题。

电磁暂态仿真是多非线性铁磁元件交互作用研究的重要手段^[15],但目前常用电磁暂态仿真平台中还没有现成的高阻抗变压器暂态特性的元件模型。如何在理论研究和解析分析的基础上,通过模型改进和参数换算,利用常用仿真平台构建高阻抗变压器暂态模型,也是一个需要解决的难点问题。

在动模试验方面,目前尚无研究从动模试验角度对高阻抗变压器的涌流特性进行试验研究并对理论与仿真分析进行验证。建立反映电磁暂态过程的高阻抗变压器物理模型,构建动态模拟电网系统,是深化高阻抗变压器特性机理研究,验证理论分析、数学模型、数字仿真正确性和继电保护应对方法有效性的重要工作。

在具有设备密集和结构复杂特征的大电网中,变压器空投及故障切除后电压突升期间避免相关保护涌流误动问题,不仅涉及本变压器励磁涌流,还涉及相邻变压器的和应涌流和电流互感器的暂态饱和等多种因素,呈现多铁磁元件交互作用的非线性电磁暂态过程,其建模与分析非常困难。需要在此

复杂场景中,研究高阻抗变压器的涌流机理、差异特征以及对保护的影响与对策。

1 高阻抗变压器工程应用概况及问题

1.1 高阻抗变压器实现方式

高阻抗变压器的主要实现方式有四种^[3]: (1) 增加绕组匝数,加大绕组间主空道面积; (2) 采用分裂绕组,分裂中压绕组或高压绕组; (3) 高压绕组内置式,将高压绕组放置在靠近铁芯侧; (4) 低压串联限流电抗器,目前主要在三角绕组环内增加电抗。如图 1 所示。上述所有方法均是通过增加等效漏磁面积以达到高漏抗的目的。

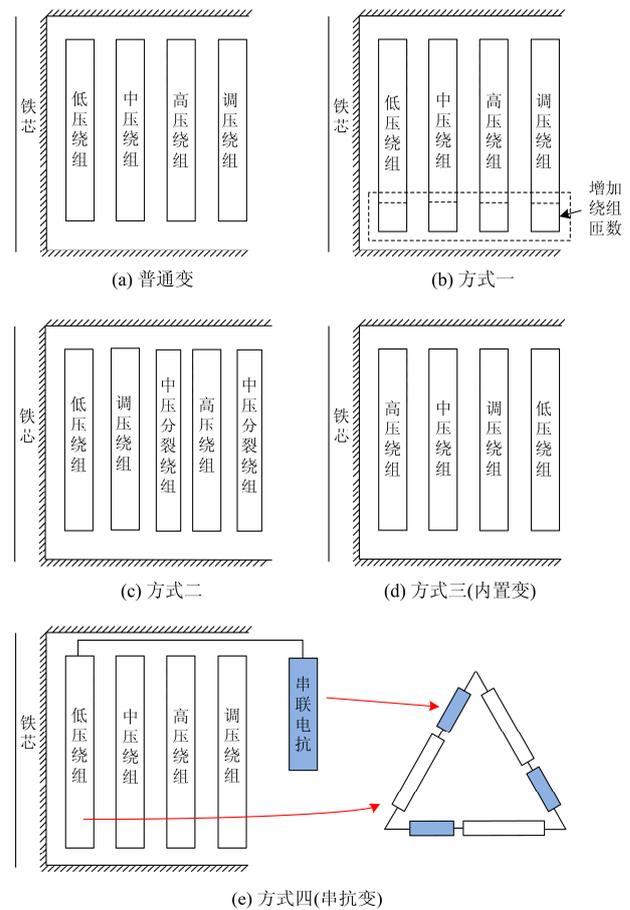


图 1 几种变压器绕组排列结构比较

Fig. 1 Comparison of several transformer winding arrangement structures

对于双绕组高阻抗变压器,第一种实现方式结构简单且成本低,为主流设计结构;对于三绕组高阻抗变压器,第一、第二种实现方式成本较高,一般不被变压器制造厂家采用,第三、第四种实现方式成本相对较低,在实现提供变压器阻抗的多种方式中^[3],高压绕组内置型高阻抗变压器与低压绕组

串抗型高阻抗变压器实现方式成本相对较低, 被变压器制造厂家较多采用。下面重点介绍第三、第四种高阻抗变压器。

(1) 高压绕组内置型高阻抗变压器(内置变)

通常三绕组高阻抗变压器高-中阻抗为标准阻抗, 高-低阻抗及中-低阻抗为高阻抗, 高压绕组内置型高阻抗变压器的结构实现方式是将高压绕组放置于靠近铁芯侧, 绕组排列为铁芯-高压-中压-调压-低压, 如图 1 所示。在满足高-中阻抗要求之后, 中-低阻抗可以通过调整中低之间的主空道面积来满足要求, 这样就能非常容易地实现阻抗匹配。

这种结构形式的最大优点是高中负载损耗低, 变压器成本低; 但由于高压绕组靠近铁芯, 所以高压绕组到铁芯之间的绝缘处理比较复杂。但随着 500 kV 自耦变压器技术的成熟与普及, 很多厂家已经掌握了 220 kV 绕组靠近铁芯的绝缘设计^[16]。所以目前来说, 绝缘设计已经不成问题。另外该产品因靠变压器本身的排布来提高阻抗, 故障率低, 可靠性高。

(2) 低压串联限流电抗器型(串抗变)

这种结构形式在早期的高阻抗变压器中比较普遍, 其特点就是在常规变压器的低压侧串联一个空心电抗器, 通过空心电抗器的电抗来增加变压器高-低和中-低阻抗, 从而达到高阻抗功能, 如图 1 所示。这种变压器从结构上来说比较简单, 也容易实现。但是变压器的体积较大, 同时由于空心电抗器的增加, 可能会带来由空心电抗器产生的一些问题, 增加了运行维护的难度, 可靠性不如高压绕组内置型^[16]。

1.2 高阻抗变压器工程应用概况

就笔者目前所能见到的统计数据看, 近年来国家电网与南方电网集中招标中, 高阻抗变压器都占了较大的比例。2012 年, 国家电网集中招标的 220 kV 变压器设备中, 高阻抗变压器比例占到了约 30%, 而在南方电网集中招标的 220 kV 变压器设备中, 高阻抗变压器比例则占到了 50%以上^[2]。

据相关变压器厂介绍, 在高低额定阻抗比小于 35%范围内, 两种结构变压器技术指标和经济成本相当, 高压绕组内置型更可靠, 体积、重量稍小; 在高低额定阻抗比大于 35%范围内, 串联内置电抗器结构的变压器成本更低。由于部分用户在过去相当长一段时间内没有完全接受串联内置限流电抗器结构, 认为增加限流电抗器额外带来故障隐患和运行风险, 运维过程中也确实出现过问题, 从而使得高压绕组内置型高阻抗变压器在特定时间段内得到了广泛的使用。但该结构与普通变压器差异较大, 三相涌流呈现较大不平衡特征, 涌流的零模分量初始值较大, 到达零序过流保护整定时延时仍大于整

定值, 引起保护动作。

近年来, 随着对串联内置限流电抗器结构高阻抗变压器认识的加深, 发现之前串联内置电抗器结构型高阻抗变压器出现故障的原因是部分厂家工艺水平不过关, 并非此种结构的固有问题。随着工艺水平的改进, 国网、南网现都已接受串抗结构, 该结构正在成为主流推荐产品。如果可以解决高压内置结构励磁涌流问题, 这种结构对阻抗值相对较低的高阻抗变压器来说, 其实现方式是一种低成本、低损耗和高可靠性的选择, 具有一定的竞争力。

因此, 无论是为满足已投运高压绕组内置型高阻抗变压器的运行需求, 还是为高压绕组内置型高阻抗变压器的应用发展扫除障碍, 都迫切需要开展此类型高阻抗变压器励磁涌流的相关研究。

1.3 高阻抗变压器现场误动案例

近年来, 国网与南网均多次出现内置变投运时励磁涌流导致保护误动情况, 危及电网运行安全。

案例 1: 某 220 kV 变电站, 21 次合闸充电, 12 次保护动作, 最严重时上级线路零序 III 段动作, 保护越级动作。内置变高压侧三相电流波形如图 2 所示, 波形呈现明显涌流特征, 三相涌流呈现较大不平衡特征, 涌流的零模分量初始值较大, 到达零序过流保护整定时延时仍大于整定值, 引起保护动作。变压器高压侧所连接 220 kV 母联(分段)开关零序 I 段整定值为 600 A、0.2 s, 充电时母联开关零序电流保护达到动作值, 保护正确动作。

案例 2: 某日夜间某变电站 3#主变的投运情况。3#主变共进行 3 次冲击合闸试验, 第 1、3 次冲击合闸因零序电流过流保护(整定值为 600 A、0.2 s)动作而失败, 第 2 次合闸成功并空载运行 10 min。3 次合闸过程零序电流分别为 960 A、240 A、640 A。

案例 3: 某日某变电站 A 站#1 主变检修完毕送电的操作, 合上 A 站#1 主变的高压侧开关后, A 站 220 kV 母线上所连的 AC 线路保护零序差动出口、开关跳闸, 对侧(C 站 220 kV 母线侧)保护零序差动出口、开关跳闸。

2 高阻抗变压器涌流特性理论分析

从现场误动事故来看, Y0/Y/ Δ 联结的三相五柱式内置变误动事故频繁, 相同铁芯结构与联结方式的串抗变与普通变的该类误动问题少见报道, 而三者的区别尽在于绕组结构, 因此需要从结构上分析涌流的差异。分析以 Y0/Y/ Δ 联结的三相五柱式变压器为例。高压侧空载合闸时, 三相励磁涌流及其零模分量只与高压绕组及低压三角绕组有关, 故采用双绕组变压器进行涌流分析。

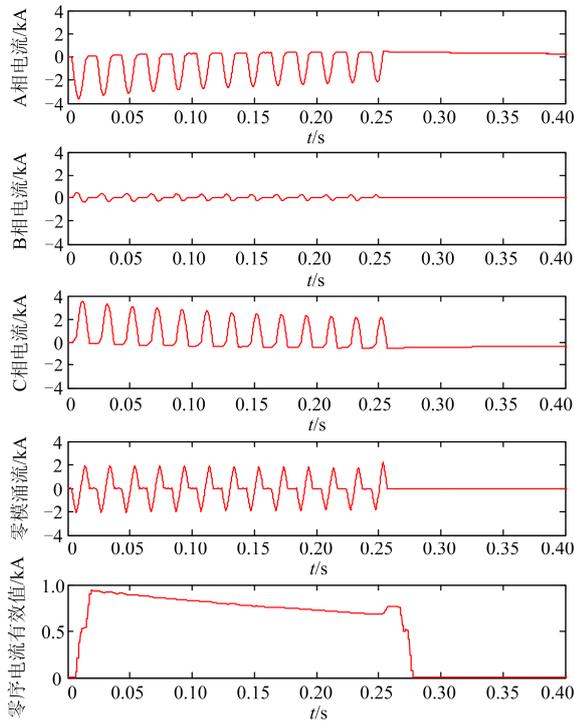


图 2 某次事故录波图

Fig. 2 Record of an accident

2.1 变压器磁通分布与单相等值电路

(1) 变压器磁通分布

内置变、串抗变、普通变的差别主要体现在绕组结构(绕组排列方式和相互间空道截面积)不同,涉及磁通在铁芯和空道中的分布。为建立能体现不同变压器上述差异的励磁涌流等值电路,需要对磁通分布和其交链关系进行分析和定义。

假设原方绕组为高压绕组。将高压绕组流过电流产生的磁通称为该绕组的“全磁通”,它可分成三部分。其中交链于低压绕组的磁通参与能量传递,称为“互磁通”。“互磁通”又包含两部分:通过铁芯部分的称为“(互)主磁通”,通过空气部分的称为“互漏磁通”。高压绕组产生不与低压绕组交链、不参与能量传递的磁通,称为“高压绕组自漏磁通”。同理,低压绕组产生的只与本身交链的磁通称为“低压绕组自漏磁通”,如图 3 所示。

进一步分析,高压绕组总漏磁链定义为 ψ_l (对应电感为 L_l),按前述说明它又分为:与低压绕组交链的间隙空气互漏磁链 ψ_k (对应电感 L_k)和只与自己交链的自漏磁链 ψ_σ (对应电感 L_σ)。由定义有 $L_l=L_\sigma+L_k$ 。

为简化分析,依据 IEC 对磁化曲线用双折线近似地假定,通过铁芯部分的主磁链也可等效分为两部分:一部分为铁芯以空气代替(即铁芯完全饱和)

时的磁链 ψ_H (对应电感 L_H);另一部分为铁芯磁化产生(即铁芯未饱和)的磁链 $\psi_F = \mu_0 NSJ$ 。其中 J 为铁芯磁化强度,是与铁芯磁化状态相关的变量,当铁芯完全饱和时, $J=J_s$ 。与 ψ_F 对应的电感为 L_F ,铁芯未饱和时,按简化假设励磁电流为 0, L_F 可认为无穷大;而铁芯饱和时则为 0。

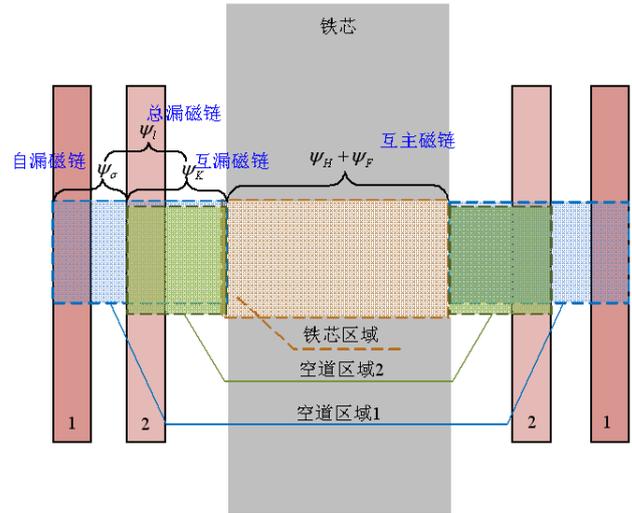


图 3 变压器磁通分布区域

Fig. 3 Transformer flux distribution area

(2) 变压器单相等值电路

不考虑外电路及变压器联结方式的情况下,磁链电感经过重新定义并考虑电阻损耗后,反映变压器励磁特性的单相等值电路如图 4 所示(已归算)。

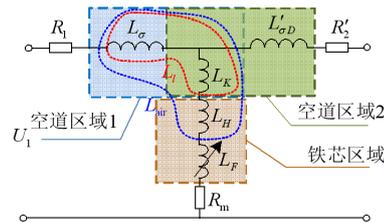


图 4 变压器单相等值电路

Fig. 4 Transformer single equal value circuit

由以上分析可知,在铁芯饱和时,有 $L_F=0$,则高压绕组的自感 L_{11} 满足: $L_{11}=L_\sigma+L_k+L_H$,又称为高压绕组空心电感,定义为 L_{air} 。如图 4 所示,其大小等于对应于空道区域 1 的高压绕组自漏感 L_l 与对应于铁芯区域电感 L_H 之和。

2.2 变压器励磁涌流解析分析

对于选取分析的绕组为 $Y_0/Y/\Delta$ 联结,铁芯结构为三相五柱式变压器,其零模磁通通路与组式变压器相似,因此在涌流分析中,其磁路可从单相变压器入手,在电路上再考虑绕组联接方式。

(1) 单相变压器励磁涌流分析

单相变压器合闸接线图如图 5。则可列写变压器合闸时电磁方程如式(1)、式(2)所示。

$$ri + \frac{d\psi}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

$$\psi = (L_s + L_l)i + \psi_r = (L_s + L_l)i + WSB_r \quad (2)$$

式中: r 为合闸回路电阻; ψ 为合闸回总磁链, 等于系统电感 L_s 对应的磁链 ψ_s 、变压器漏感 L_l 对应的磁链 ψ_l 及铁芯磁链 ψ_r 之和; B_r 为变压器铁芯磁密; S 为铁芯截面积; W 为变压器高压绕组的匝数。

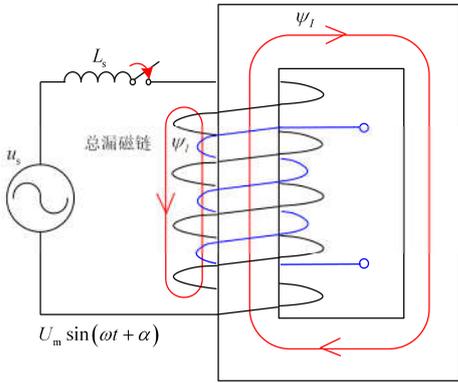


图 5 单相变压器合闸接线图

Fig. 5 Single-phase transformer closing wiring diagram

联立式(1)、式(2)可解得

$$\psi = \frac{U_m}{\omega} [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] + \psi_r - r \int_0^t i dt \quad (3)$$

式中, ψ_r 为铁芯剩磁磁链, $\psi_r = WSB_r$, B_r 为剩磁磁密。为简化分析, 暂不计电源回路及变压器电阻, 即不考虑磁链的衰减, 式(3)成为式(4)。

$$\psi = \frac{U_m}{\omega} [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] + \psi_r \quad (4)$$

再考虑铁芯的磁化特性曲线, 简化为双折线模型, 如图 6 所示。

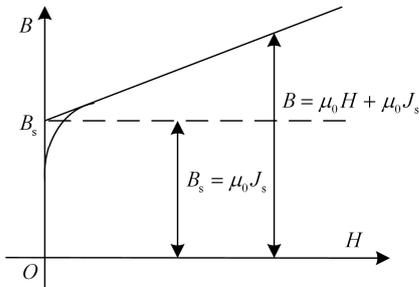


图 6 铁芯励磁特性曲线

Fig. 6 Core magnetizing characteristic curve

当 $B < B_s$ 时, 因磁场强度很小, 磁化特性曲线即以纵坐标本身表示, 在此线段 $H=0$, 导磁率等于

无穷大, 磁密为 $B = \mu_0 J$, J 为磁化强度。

当 $B > B_s$ 时, 磁化曲线以直线表示, 斜率为 μ_0 , 即微分导磁率等于空气导磁率 μ_0 。有 $B = \mu_0 J_s + \mu_0 H$ 。 J_s 为饱和磁化强度。

对于铁芯磁链, 根据安培环路定则, 有

$$\begin{cases} \psi_r = WSB \\ H = \frac{Wi}{l} \end{cases} \quad (5)$$

联立式(2)、式(4)、式(5), 可解得单相变压器励磁涌流为

$$i = \frac{U_m}{\omega L} \left[\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha) - \frac{\omega W S J_s - \omega \psi_r}{U_m} \right] \quad (6)$$

式中, $L = L_s + L_{\sigma} + L_K + L_H$ 。

(2) Y_0/Δ 三相变压器励磁涌流分析

三相 Y_0/Δ 三相变压器励磁涌流等值电路如图 7 所示。

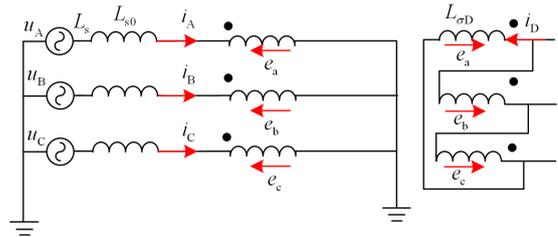


图 7 Y_0/Δ 三相变压器励磁涌流等值电路

Fig. 7 Y_0/Δ Three-phase transformer magnetizing inrush

列写三相电磁方程, 化简后可得式(7)。

$$\begin{cases} u_A = (L_s + L_{\sigma}) \frac{di_A}{dt} + (L_{s0} - L_s) \frac{di_0}{dt} + e_a \\ u_B = (L_s + L_{\sigma}) \frac{di_B}{dt} + (L_{s0} - L_s) \frac{di_0}{dt} + e_b \\ u_C = (L_s + L_{\sigma}) \frac{di_C}{dt} + (L_{s0} - L_s) \frac{di_0}{dt} + e_c \end{cases} \quad (7)$$

式中: L_s 与 L_{s0} 分别为系统正序和零序电感; L_{σ} 为变压器原方绕组漏感; e_a 、 e_b 、 e_c 分别为变压器三相励磁支路感应反电动势。

令 $L_{\sigma D}$ 为变压器副方绕组的漏感, i_D 为 Δ 侧环流电流, 则副方 Δ 回路有式(8)成立。

$$e_a + e_b + e_c = -3L_{\sigma D} \frac{di_D}{dt} \quad (8)$$

且有:

$$i_A + i_B + i_C = 3i_0 \quad (9)$$

联立式(7)一式(9), 结合绕组的初始电流均为 0, 可得

$$i_0 = \frac{L_{\sigma D}}{L_{s0} + L_{\sigma}} i_D \quad (10)$$

i_D 为一零模性质电流。可见，高低压侧零模电流之比为各自漏抗反比。

由自、互感理论，则 A 相总磁链为

$$\psi_A = (L_s + L_{\sigma} + L_K + L_H) i_A + (L_K + L_H) i_D + (L_{s0} - L_s) i_0 + \mu_0 W S J_A \quad (11)$$

结合单相变压器励磁涌流推导，联立式(6)、式(4)、式(10)、式(11)，以及 $B_f(t) = \mu_0 J(t)$ ， $U_m = \omega W S B_m$ ，可以求解出三相励磁涌流及其零模分量，公式如下：

$$\begin{cases} i_A = \frac{U_m}{\omega L} [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] + \frac{B_{rA} - \mu_0 J_A}{B_m} - c i_0 \\ i_B = \frac{U_m}{\omega L} [\cos(\alpha - 120^\circ) - \cos(\omega t + \alpha - 120^\circ)] + \frac{B_{rB} - \mu_0 J_B}{B_m} - c i_0 \\ i_C = \frac{U_m}{\omega L} [\cos(\alpha - 240^\circ) - \cos(\omega t + \alpha - 240^\circ)] + \frac{B_{rC} - \mu_0 J_C}{B_m} - c i_0 \end{cases} \quad (12)$$

$$i_0(t) = \frac{U_m \left(\sum_A^C B_r - \sum_A^C B_J(t) \right)}{3\omega B_s \left[\frac{M_{air} (L_{s0} + L_{\sigma})}{L_{\sigma D}} + L_{s0} + L_{\sigma} + M_{air} \right]} \quad (13)$$

式中： U_m 为系统电源幅值； B_r 为铁芯初始剩磁。由式(13)可见，励磁涌流零模分量取决于变压器三相铁芯的初始剩磁以及涌流过程中的磁化强度的不平衡度大小。当三相初始剩磁之和为 0，且三相铁芯饱和程度一致时，三相磁化强度对称，零模分量将为 0。

根据式(10)，得到励磁支路总电流为

$$i_{\Sigma m}(t) = i_0(t) + i_D(t) = \frac{U_s \left(\sum_A^C B_r - \sum_A^C B_J(t) \right)}{3\omega B_s \left[M_{air} + \frac{L_{\sigma D} (L_{s0} + L_{\sigma})}{L_{\sigma D} + (L_{s0} + L_{\sigma})} \right]} \quad (14)$$

2.3 变压器零模涌流等值电路

图 8 为由式(14)可以推导出的零模涌流等值电路。零模涌流由励磁支路的等值电势源 $u(t)$ 产生，有

$$u(t) = \frac{U_m}{3} \left(\sum_A^C \frac{B_r}{B_m} - \sum_A^C \frac{B_J(t)}{B_m} \right) \quad (15)$$

式中， $B_J(t) = \mu_0 J$ 。由式(13)和式(15)可知，零模涌

流与零模等值电势源大小密切相关。零模涌流等值电势源大小取决于变压器三相铁芯的初始剩磁以及涌流过程中的磁化强度的不平衡度大小，而最终当剩磁消失以及三相铁芯将逐渐退出饱和，三相磁化强度对称时，零模涌流等值电势源减小为零。从理论上如何对零模等值电势进行精确求解，还是一个难点问题。

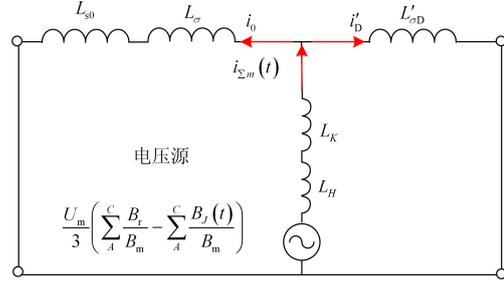


图 8 零模涌流等值电路

Fig. 8 Zero mode inrush current equivalent circuit

图 8 是不计电源回路及变压器电阻，即不考虑磁链的衰减的前提下得到的，代表着合闸初始时刻励磁支路电流的分配关系。而电阻是实际存在的，它将引起电流的衰减。本文将在仿真建模与分析中对由于等效电势衰减引起磁链的衰减和由绕组电阻引起电流的衰减一并考虑。

2.4 不同类型变压器零模涌流对比分析

由上节推导分析可知，变压器励磁涌流将取决于等值电路中电气参数(电感与电阻)。而这些参数将直接受到绕组结构的影响。以容量(MVA)为 240/240/80，额定电压(kV)变比为 220/115/10.5 的变压器为例，分析不同类型三绕组变压器的电气参数差异。

(1) 短路阻抗

不同类型变压器短路阻抗见表 1。

表 1 不同类型变压器短路阻抗参数对比

Table 1 Equivalent leakage reactance comparison on different sides of different types of transformers

短路阻抗	高-中	高-低	中-低
普通变	8%	23%	13%
内置变	14%	36%	21%
串抗变	14%	36%	21%

基于传统的三绕组变压器 T 型等值电路进行计算，得到的不同类型变压器各侧漏抗，见表 2。可见不同类型变压器高压侧自漏抗基本相等，在 14% 左右；内置变低压侧自漏抗与串抗变相等，为 21.5%，普通变则为 9%。内外侧绕组自漏抗之比基本满足 2:3 的比例关系。

表 2 不同类型变压器各侧等效漏抗对比

Table 2 Equivalent leakage reactance comparison on different sides of different types of transformers

各侧短路阻抗	高压侧	中压侧	低压侧
普通变	14%	-1%	9%
内置变	14.5%	-0.5%	21.5%
串抗变	14.5%	-0.5%	21.5%

(2) 空心电抗

变压器暂态特性分析的难点在于其励磁支路的电感是非线性的。仍采用双折线模型进行近似分析。双折线模型将变压器的励磁特性线分为饱和段和不饱和段: 不饱和段直线与纵轴几乎重合, 分界拐点对应饱和磁通为 Φ_s ; 当大于磁通 Φ_s 时, 饱和段采用斜线, 其斜率即为绕组的空心电感 L_{air} , 计算公式如式(16)^[17]。

$$L_{air} = \frac{\mu_0 \pi N D^2}{4d} \quad (16)$$

式中: D 为线圈直径; d 为导线直径; μ_0 为磁导率。

不同类型变压器的导线直径差异可忽略不计, 线圈直径如图 9 所示。

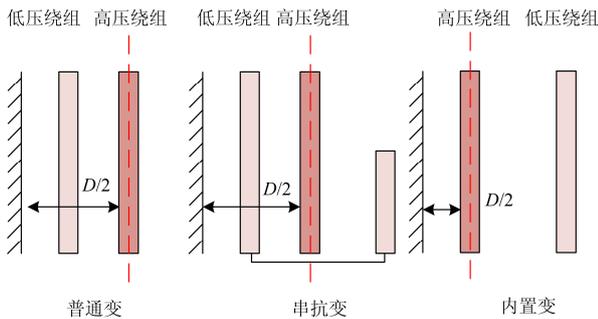


图 9 不同类型变压器的线圈直径对比图

Fig. 9 Comparison of coil diameters of different types of transformers

由图9可见, 内置变的高压绕组线圈直径 D 较普通变和串抗变均变小, 故内置变 L_{air} 将变小。由式 $L_{air} = L_{\sigma} + L_K + L_H$, 可见内置变互漏感 L_K 小于串抗变和普通变。

综合上述分析, 不同变压器漏感参数及对比关系如表 3 所示。由式(13), 则不同变压器零模电流计算公式及大小对比如下。

普通变压器零模涌流:

$$i_{0(tr)}(t) = \frac{U_m \left(\sum_A^c B_r - \mu_0 \sum_A^c J(t) \right)}{3\omega B_m \left[\frac{(L_{K(tr)} + L_H)(L_{s0} + L_{\sigma(tr)})}{L_{\sigma D(tr)}} + L_{s0} + L_{\sigma(tr)} + L_{K(tr)} + L_H \right]} \quad (17)$$

表 3 不同变压器漏感参数及对比

Table 3 Different transformer leakage inductance parameters and comparison

	高压侧漏感	间隙空气电感	低压侧漏感
普通变	$L_{\sigma(tr)}$	$L_{K(tr)}$	$L_{\sigma D(tr)}$
内置变	$L_{\sigma(Hin)}$	$L_{K(Hin)}$	$L_{\sigma D(Hin)}$
串抗变	$L_{\sigma(Lse)}$	$L_{K(Lse)}$	$L_{\sigma D(Lse)} = L_{\sigma D(tr)} + L_{ck}$
对比 关系	$L_{\sigma(tr)} \approx L_{\sigma(Hin)} \approx L_{\sigma(Lse)}$		
	$L_{K(tr)} = L_{K(Lse)} > L_{K(Hin)}$		
	$L_{\sigma D(tr)} < L_{\sigma D(Hin)} = L_{\sigma D(Lse)}$		

串抗变压器零模涌流:

$$i_{0(Lse)}(t) = \frac{U_m \left(\sum_A^c B_r - \mu_0 \sum_A^c J(t) \right)}{3\omega B_m \left[\frac{(L_{K(Lse)} + L_H)(L_{s0} + L_{\sigma(Lse)})}{L_{\sigma D(Lse)}} + L_{s0} + L_{\sigma(Lse)} + L_{K(Lse)} + L_H \right]} \quad (18)$$

内置变零模涌流:

$$i_{0(Hin)}(t) = \frac{U_m \left(\sum_A^c B_r - \mu_0 \sum_A^c J(t) \right)}{3\omega B_m \left[\frac{(L_{K(Hin)} + L_H)(L_{s0} + L_{\sigma(Hin)})}{L_{\sigma D(Hin)}} + L_{s0} + L_{\sigma(Hin)} + L_{K(Hin)} + L_H \right]} \quad (19)$$

上述式中红色箭头表示不同类型高阻抗变压器间对应参数相对于普通变的大小对比情况。通过式(17)、式(18)、式(19)对比分析可见, 在不考虑涌流衰减时(或是在涌流起始时刻), 三种变压器的零模等值电势基本相等, 故可得内置变压器的零模涌流最大, 串抗变次之, 普通变压器最小。

以上揭示了三种类型变压器励磁涌流幅值的关系, 下面将分析不同类型变压器涌流衰减的大小关系。空心线圈直流电阻 R 的计算公式如式(20)。

$$R = \frac{4\rho\pi ND}{d^2} \quad (20)$$

式中: D 为线圈直径; d 为导线直径; ρ 为导线电阻率。若不考虑系统参数的影响, 由式(16)和式(20)可以得到铁芯深度饱和情况下的衰减时间常数, 如式(21)所示。

$$\tau = \frac{L_{air}}{R} = \frac{\mu_0 D d}{16\rho} \quad (21)$$

根据式(21), 内置变由于高压绕组线圈的直径更小, 所以其在铁芯深度饱和情况下的衰减时间常数较小, 其涌流将会衰减更快, 而串抗变和普通变涌流衰减常数一样, 其衰减速度一致。

3 高阻抗变压器涌流特性仿真分析

涌流的仿真研究需要对铁磁元件进行建模, 并

结合外电路进行综合仿真分析，所以利用现有的仿真平台来建模是非常必要的。本文基于 PSCAD 软件进行高阻抗变压器的涌流仿真研究。

3.1 基于 PSCAD 的高阻抗变压器仿真建模

PSCAD 中变压器的建模主要有两种方式：经典模型(基于电路)和 UMEC 模型(基于磁路)。虽后者可较好地反映三相五柱式变压器，但因其包含了众多与铁芯结构、设计相关的参数，较难获取，且暂无三绕组变压器仿真模型，故本研究中采用经典变压器模型。

前述理论分析表明，不同类型变压器高低压侧自漏抗差异较大，而 PSCAD 在计算高低压绕组各自漏抗中未体现上述差异。因此需要对此等值电路进行修改和换算。以往文献未注意这一关键问题，会导致对空投励磁涌流尤其是零模涌流的仿真错误。本文提出了一种基于漏抗补偿的修正方法，解决了上述这个问题。(限于篇幅，将在后续文章中进行深入探讨，此处从略)

3.2 高阻抗变压器仿真模型验证

结合某变电站高阻抗变压器投运过程中出现零序保护误动事故的现场案例，对修正后的变压器仿真模型进行验证并利用其进行涌流的仿真研究。

相关参数均采用现场实际值，变压器漏抗、损耗与励磁特性参数按改进方法进行修正，剩磁参数也参照现场录波调定。内置变三相励磁涌流、零模励磁涌流的仿真与现场录波波形的对比如图 10、图 11 所示。根据录波看出，满足了零序 I 段的动作条件(600 A, 0.2 s)，断路器于约 0.26 s 时刻断开。结果表明：仿真波形和现场录波吻合度较高，说明改进的仿真模型能够很好地用于高阻抗变压器励磁涌流以及零模涌流特性的仿真研究。

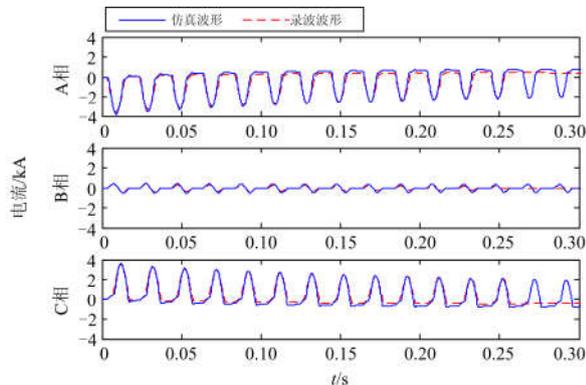


图 10 三相励磁涌流仿真与录波对比

Fig. 10 Comparison of three phase magnetizing inrush current simulation and recorded wave

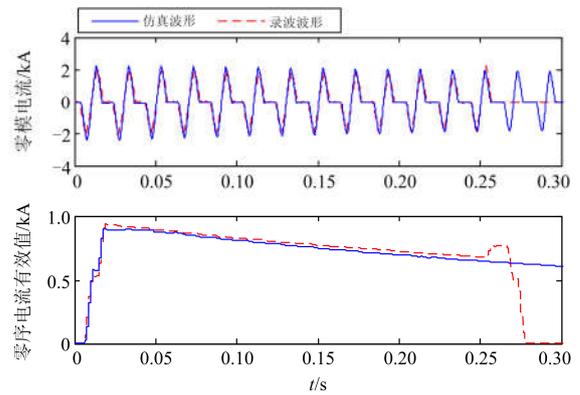


图 11 零模电流和零序电流有效值仿真与录波对比图

Fig. 11 Comparison of zero-mode inrush current and zero-sequence current simulation and recorded wave

3.3 不同类型变压器零模涌流仿真分析

依据第 2 节三种变压器的参数分析，在相同的外部条件下进行仿真，并考虑了电流互感器的模型^[18-19]，仿真得到三者的零模电流及零序电流有效值如图 12 所示。

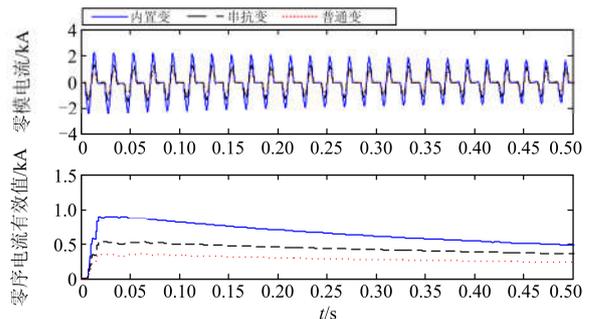


图 12 不同类型变压器零模电流和零序电流有效值对比图

Fig. 12 Comparison of effective values of zero mode currents of different types of transformers

通过仿真，可以发现：对于零模电流及零序电流有效值，内置变最大，其次是串抗变，最小的是普通变。从衰减趋势来看，内置变零模涌流衰减更快，串抗变和普通变的衰减速度基本相同且较内置变慢，仿真验证了机理分析的正确性。

为了分析三者零模电流对零序过流保护 I 段(600 A, 0.2 s)、II 段(240 A, 0.5 s)的影响。在对称性剩磁^[20]下饱和磁密为 1.7 T 时，对三者合闸角分别为 $-90^{\circ} \sim 270^{\circ}$ (每隔 30°)时进行仿真。

通过图 13—图 15 的仿真可以发现：在对称性剩磁下，变压器涌流零序电流随合闸角度变化而变化，且对应时刻角度均满足前述理论分析的结论(幅值关系：内置变 > 串抗变 > 普通变)。内置变产生的零模涌流容易造成零序过流保护 I 段、II 段误动，

串抗变也有较小可能性造成 II 段误动风险, 普通变几乎不会误动。

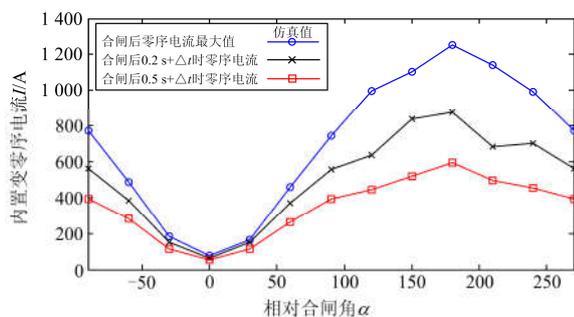


图 13 内置变零序电流与合闸角关系

Fig. 13 Relationship between the zero-sequence current of T-Hin and the closing angle

注: 图中 Δt 为合闸后零序电流最大值时刻, 下同。

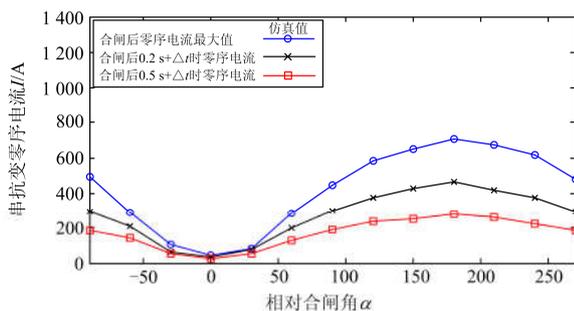


图 14 串抗变零序电流与合闸角关系

Fig. 14 Relationship between the zero-sequence current of T-Lse and the closing angle

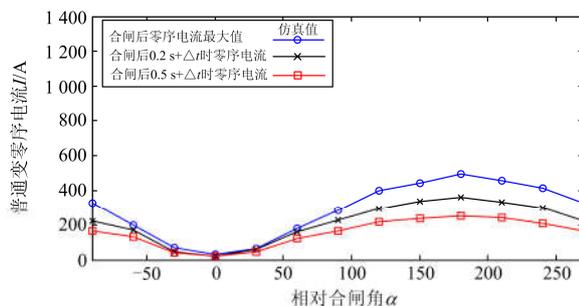


图 15 普通变零序电流与合闸角关系

Fig. 15 Relationship between the zero-sequence current of T-Tra and the closing angle

4 进一步深入研究的关键问题

在对高阻抗变压器涌流特性及其对保护的影响的研究中, 上述分析中大多进行了简化假设或估算。在理论仿真分析、动模验证以及最终高阻抗变压器

的安全应对策略几个层面上均有关键问题尚需突破。

4.1 理论分析的关键问题

在零模涌流的衰减分析中, 曾假设零模回路等值电势不衰减, 仿真表明这对类比不同变压器零模衰减相对趋势存在合理性。但实际上, 零模等值电势由三相铁芯饱和不一致产生, 随零模电流衰减而衰减(最终衰减为 0), 其衰减受变压器和系统参数共同影响。需进一步研究零模等值电势衰减规律, 这对分析零模涌流特性非常关键。

4.2 仿真建模的关键问题

涌流的仿真研究需要对变压器及 CT 等多种非线性铁磁元件建模, 并考虑变压器与变压器间, 变压器与 CT 间的励磁涌流、和应涌流, 即多铁磁元件交互作用的仿真分析。

目前变压器试验只能获得绕组间的短路阻抗, 无法获取自漏抗及互漏抗, 本文则参考空道截面积估算获得。现有 PSCAD 中变压器仿真模型不经修正无法区分不同类型的变压器。由此产生了两个难题: (1) 准确获取实际变压器自漏抗、互漏抗的方法; (2) 构建能够考虑自互漏抗差异的变压器仿真模型。

对于仿真建模难题(1), 有以下研究思路供探讨:

a) 新的变压器漏抗测试方法, 直接或间接获取相关参数。如增加高压侧空载试验等。

b) 基于结构参数的计算方法。如依据磁通分布与结构的关系进行计算。

c) 基于磁场分布的有限元计算方法。难点在于电磁暂态的有限元算法。

对于仿真建模难题(2), 有以下研究思路供探讨:

a) 采用 PSCAD 中的新版电磁模型, 同时结合变压器结构以及自漏抗和短路阻抗之间的数学关系, 研究更为精确的参数计算方法。

b) 设计和构建全新仿真模型(PSCAD 自定义模型)或采用基于有限元的磁场耦合仿真平台。

4.3 物理试验研究的关键问题

建立反映电磁暂态过程的高阻抗变压器物理模型, 构建动态模拟电网系统, 是深化高阻抗变压器特性机理研究, 验证理论分析、数学模型、数字仿真正确性和继电保护应对方法有效性的重要工作。这需要构建不同类型变压器的物理模型, 研究与原型具有相同物理特性的动模试验模型的设计和制作方案、研究试验与测试方法。

4.4 高阻抗变压器安全运行应对策略的关键问题

针对高阻抗变压器涌流对保护造成误动或其他影响问题, 优化变压器结构, 优化控制方法, 并研究保护原理等是提高变压器等元件安全稳定运行的关键。

5 高阻抗变涌流问题的应对思路

针对现场中多次出现内置变投运过程中零序过流保护误动作的问题,通过上述初步理论仿真分析可知:零模涌流产生的本质原因是变压器铁芯的不一致饱和。内置变因其绕组结构原因,在增大短路阻抗的同时减小了绕组互感,励磁涌流与零模涌流幅值很大,易造成零序过流保护误动,还可能会对变压器差动保护产生影响。而变压器涌流特性又受变压器的漏抗、损耗、剩磁等内部因素以及合闸角与系统参数等外部因素的影响。因此,为减弱涌流对零序保护的影响,避免保护再次误动,从以下四个方面提出应对思路。

5.1 优化绕组结构

分析内置变零序涌流增大的原因是其绕组排列方式的改变,在增大短路阻抗的同时减小了高低绕组间互感抗。故可考虑优化绕组结构。原则是满足高-低、中-低绕组高短路阻抗的要求下,使得励磁涌流尤其是零模涌流最小。

5.2 优化控制方式

探讨采用合闸角优化控制的变压器空投方式,包括三相合闸空投方式和分相合闸空投方式。这需要综合考虑剩磁等多种因素的影响;一般而言,分相控制最优合闸角更有利于减少励磁涌流,但这种三相不一致合闸引起的零模分量仍需要研究。

5.3 工程适用场合

研究高阻抗变压器安全运行的工程适用场合。比如避免在变电站出线较少工况投运。

5.4 改进保护原理

- 1) 依据高阻抗变压器涌流及多铁磁元件暂态特性,改进差动保护新原理;
- 2) 依据零模涌流特征,探讨基于综合谐波制动的自适应零序电流保护;
- 3) 研究相关保护的改进算法。

6 结论

针对广泛使用的高阻抗变压器引起保护误动的问题,本文围绕两种常用的高阻抗变压器(高压绕组内置型、低压绕组串联电抗型)论述了其涌流特征及其对保护的影响。

(1) 从绕组结构入手,结合磁通分布明确了变压器等值电路的参数对应关系以及高阻抗变压器类型反映在自互漏感参数上的差异。饱和时,内置变涌流衰减时间常数比串抗变和普通变的都减小,衰减更慢。

(2) 通过数学推导,得到了变压器零模涌流的解

析表达式并构建了其等值电路,从理论上分析得出内置变因为互漏抗小会产生更大的零模涌流。

(3) 构建了改进的高阻抗变压器仿真模型,结合剩磁和合闸角,验证了上述结论的正确性,并分析比较了三种涌流对零序过流后备保护的影响。

(4) 从完善仿真和物理试验平台、优化变压器绕组结构和运行控制方法等多方面,讨论了进一步深化研究高阻抗变压器涌流特性及其对保护影响的关键问题及应对思路。

参考文献

- [1] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [2] 周雨. 一种 220 kV 高阻抗变压器工程设计新方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2013. ZHOU Yu. A new engineering design method of 220 kV high-impedance transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [3] 李勇, 苏钟焕, 王然丰, 等. 高压内置型高阻抗变压器励磁涌流计算分析[J]. 变压器, 2017, 54(8): 1-5. LI Yong, SU Zhonghuan, WANG Ranfeng, et al. Calculation and analysis of magnetizing inrush current of high impedance transformer with built-in high voltage winding[J]. Transformer, 2017, 54(8): 1-5.
- [4] 李晓华, 罗龙波, 谢金泉, 等. 高压内置型高阻抗变压器涌流特性对保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 108-114. LI Xiaohua, LUO Longbo, XIE Jinquan, et al. Impact of inrush current characteristics of high-voltage built-in high-impedance transformer on relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 108-114.
- [5] LIN Xiangning, HUANG Jiangguang, ZENG Linjun, et al. Analysis of electromagnetic transient and adaptability of second-harmonic restraint based differential protection of UHV power transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2299-2307.
- [6] GUZMAN A, ZOCHOLL S, BENMOUYAL G, et al. A current-based solution for transformer differential protection-part II: relay description and evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(2): 660-660.
- [7] 陈德树, 尹项根, 张哲, 等. 虚拟三次谐波制动式变压器差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 20-24.

- CHEN Deshu, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Virtual third harmonic restrained transformer differential protection principle and practice[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 20-24.
- [8] SHARP R L, GLASSBURN W E. A transformer differential relay with second-harmonic restraint[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1958, 77(3): 913-918.
- [9] SIDHU T S, SACHDEV M S. Online identification of magnetizing inrush and internal faults in three-phase transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(4): 1885-1891.
- [10] KENNEDY L F, HAYWARD C D. Harmonic-current-restrained relays for differential protection[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1938, 57(5): 262-271.
- [11] 胡玉峰, 陈德树. 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 55-58, 63.
HU Yufeng, CHEN Deshu. A new method to identify inrush current based on sampled values[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 55-58, 63.
- [12] 许家源, 华争祥, 朱苛娄, 等. 选相关合技术抑制空载变压器励磁涌流的实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 135-141.
XU Jiayuan, HUA Zhengxiang, ZHU Kelou, et al. Experimental research on inrush current suppression of unloaded transformers based on the controlled switching[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 135-141.
- [13] 杨汾艳, 余超耘, 盛超, 等. 空充变压器时直流线路沿线 50 Hz 分量分布的定量计算研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 114-121.
YANG Fenyan, YU Chaoyun, SHENG Chao, et al. Research on a quantitative calculation method of 50 Hz components distribution along HVDC transmission line when energizing a no-load transformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 114-121.
- [14] 黄少锋, 申洪明, 刘欣, 等. 基于能量信息的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 110-113.
HUANG Shaofeng, SHEN Hongming, LIU Xin, et al. A novel identification criterion for inrush current based on energy information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 110-113.
- [15] 尹项根, 张哲, 王友怀, 等. 变压器间及其与电流互感器暂态交互作用分析和保护对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 1-9.
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, WANG Youhuai, et al. Multiple transformers and CTs interactive effect and its impact on the protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 1-9.
- [16] 李洪春. 220 kV 三绕组有载调压高阻抗变压器设计[J]. 变压器, 2009, 46(5): 1-7.
LI Hongchun. Design of 220 kV on-load-tap-changing high impedance transformer with three windings[J]. Transformer, 2009, 46(5): 1-7.
- [17] 张建松. 变压器励磁涌流形成机理以及电流互感器仿真模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [18] YIN X, ZHANG Z, QI X, et al. Modeling and analysis for practical CT based on transient test and parameter identification[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2016, 2(4): 51-57.
- [19] WU Yahui, DONG Xinzhou, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach Theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [20] 焦在滨, 行武, 王钊, 等. 变压器励磁涌流负序二次谐波特征及机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 146-151.
JIAO Zaibin, XING Wu, WANG Zhao, et al. Features and mechanism of negative-sequence second harmonics of magnetizing inrush current in transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 146-151.

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

尹项根(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制; E-mail: xgyin@hust.edu.cn

曹文斌(1992—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 1019097704@qq.com

潘远林(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 魏小丽)