

具有双重保护的变压器直流偏磁抑制方法研究

朱洪防, 张 凯, 张 力, 刘 博, 杨少辉

(国网山东滨州供电公司, 山东 滨州 256600)

摘要: 对现有直流偏磁抑制技术进行分析研究, 提出了一种具有双重保护功能的新型直流偏磁抑制措施。在抑制变压直流偏磁产生的同时, 当系统发生故障时, 通过旁路回路的投入对电容器提供双重保护, 确保设备安全。利用仿真软件, 对发生直流扰动与单相接地故障下的变压器进行仿真计算, 通过对仿真结果的比较分析验证了所提方法的有效性。

关键词: 变压器; 直流偏磁; 双重保护; 抑制措施

Research on the new DC bias suppression method for transformer with double protection

ZHU Hongfang, ZHANG Kai, ZHANG Li, LIU Bo, YANG Shaohui

(State Grid Shandong Binzhou Power Supply Company, Binzhou 256600, China)

Abstract: The existing DC bias suppression technology is analyzed, and a new DC bias suppression measure with dual protection function is proposed. This method can suppress the DC bias of transformer. At the same time, when the system is in fault, double protection is provided to the capacitor through the input of bypass circuit to ensure the safety of equipment. The simulation software is used to simulate the transformer under DC disturbance and single-phase to ground fault. The effectiveness of the proposed method is verified by the analysis of the simulation results.

Key words: transformer; DC bias; double protection; suppression method

0 引言

随着我国经济的快速增长, 用户对电力的需求急剧增加。传统的交流输电方式输送功率较小, 线路损耗大不适合远距离输电, 所以目前主要使用高压直流输电方式进行电能的远距离传

输^[1-4]。由于不正确操作或者线路故障会导致直流输电系统处于接地运行的异常工作状态。此时直流电流会通过接地极直接流入周围大地, 并以大地作为传输介质流入中性点接地的变压器内部。当入侵的直流大于一定的数值后会在变压器内部引起严重的直流偏磁效应^[5-7]。

直流入侵时, 会对变压器的可靠运行造成严重影响, 不利于系统稳定。直流偏磁会加深变压器的励磁饱和程度, 从而导致漏磁增大, 并且随着无功损耗的增加, 使得系统电压水平有所下

变 压 器 内 部 绕 组 运 行 状 态 监 测 系 统 (5206151800WW); 国 网 山 东 省 电 力 公 司 科 研 柔 性 管 理 团 队 研 发 项 目 (SGSDBZ00YJJS1900473)

降,甚至发生电压崩溃现象,系统的继电保护装置也会出现非正常跳闸^[8-11]。

目前,相关研究学者已对变压器直流偏磁问题进行了大量研究。文献[12]以500 kV电力变压器作为研究对象,发现交直流混合情况下变压器励磁饱和,励磁电流发生畸变,同时振动和噪声也明显加剧。文献[13]基于J-A理论建立了单相变压器遭受直流扰动的仿真模型,并对其励磁谐波特性进行深入研究。文献[14]考虑了变压器遭受直流扰动时的铁心涡流损耗,引入直流偏置系数,对变压器耐受直流的能力进行估算。综上所述,诸多学者已对变压器直流偏磁特性作了大量研究,但对于直流偏磁的抑制措施研究却相对较少。

本文对现有的串联电阻、串联电容等直流偏磁抑制技术进行分析,从原理剖析各种方法的特点,并且提出了一种具有双重保护功能的新型直流偏磁抑制措施。设置接地的旁路保护回路为隔直电容器提供后备保护,同时,旁路保护回路中的火花间隙又能够为避雷器提供后备保护。建立变压器仿真模型,对直流扰动下使用抑制措施的变压器与没有使用抑制措施的变压器的励磁电流进行仿真计算,验证其直流抑制能力。同时,建立发生单相接地故障的变压器仿真模型,验证了本文所提抑制措施的有效性。

1 变压器直流偏磁抑制技术

考虑到直流偏磁所带来的严重危害,专家学者已开始着手于直流偏磁抑制措施的研究。研究过程中需要考虑到直流偏磁对变压器继电保护以及变压器中性点安全性等因素的影响。目前使用较为普遍的抑制措施主要有:串联电阻法、中性点串联电容法、反向直流电流注入法以及直流电位补偿法^[15]。

1.1 串联电阻法

串联电阻法就是在变压器的中性线上串联一个阻值很小的电阻,如图1所示。当直流电流进入到变电站接地网时,由于串联电阻的接入使得变压器中性点接地回路的阻值增大,对直流电流产生很大的阻碍作用以降低其数值。在这种情况下

只有少量的直流电流能够进入变压器内部,从而减轻直流偏磁效应,保护变压器。

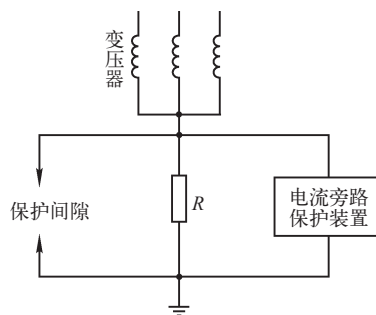


图1 串联电阻法

Fig. 1 Series resistance method

这种方法利用电阻对电流的阻碍作用抑制直流电流,虽然原理简单,成本低廉,但具有较大的局限性,无法推广使用。通过串联电阻只能最大程度地限制入侵直流电流的大小,但无法从根本上消除直流电流。若为了降低入侵直流电流大小而使用大阻值的电阻会使电阻发热严重,阻值急剧增大,不利于大型变压器的有效接地。同时,为了更好地限制直流电流,所串联电阻的阻值需要随着系统的运行方式发生改变,会增加继电保护设备的配置难度。

1.2 中性点串联电容法

中性点串联电容法通过在变压器的中性线上串联电容器以隔离直流电流,基本原理如图2所示。利用电容器通交流、隔直流的特点,阻隔入侵的直流电流,而变压器处于正常工况时交流电流能够顺利通过电容器流入大地。与串联电阻法相比,该方法能够有效隔离直流电流,且对继电保护配置的影响较小,在实际工程中应用最多。

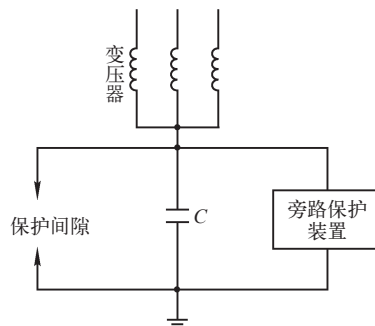


图2 串联电容法

Fig. 2 Series capacitance method

1.3 反向直流电流注入法

在变压器中性点处安装直流装置，发生直流电流入侵时能够产生与入侵直流电流方向相反的直流电流，从而抑制入侵的直流电流的大小，其基本原理如图3所示。其中，反向注入的直流电流被分为两部分：数值较大一部分通过接地极直接流入大地，不会影响交流系统；剩余部分则会通过变压器进入交流系统，再通过其他接地点流回大地。该方法能有效降低入侵直流电流大小。

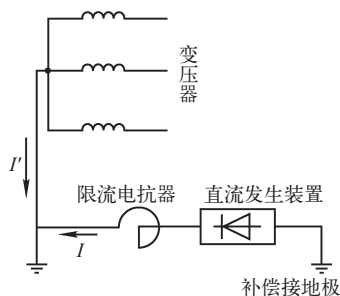


图3 反向直流电流注入法

Fig. 3 Reverse DC injection method

该方法通过额外的接地极注入直流电流，具有很高的灵活性，可以根据实际情况改变注入的直流电流大小和方向，并且不会改变中性点结构，无须调整继电保护设备动作值，但经济性较差。

1.4 直流电位补偿法

在变电站和变压器中性点之间串联一直流电位补偿装置，如图4所示。利用补偿装置产生的反向直流电位抵消中性线上的直流电流。中性点所需的串联电阻阻值更小，进一步降低了中性点电阻对继电保护装置的影响。但是该方法也存在一些缺点：设备造价高昂，经济性差，对系统继电保护的影响不能完全消除，由于其内部电源的存在会导致接地网腐蚀加剧，不利于安全运行。

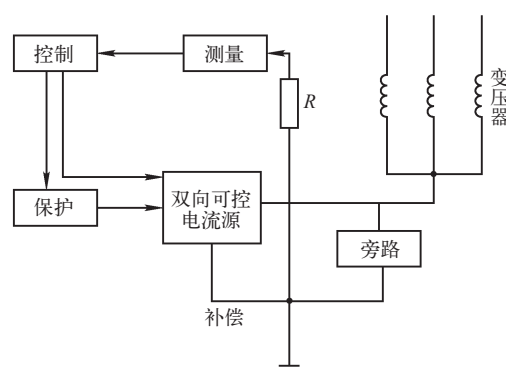


图4 直流电位补偿法

Fig. 4 DC potential compensation method

为基础，本文提出了一种具有双重保护功能的直流偏磁抑制措施，基本原理如图5所示。

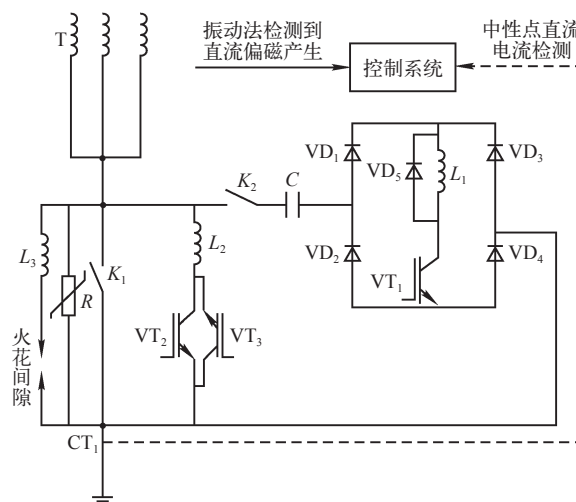


图5 直流抑制方法原理图

Fig. 5 Principle diagram of DC suppression method

图5中，VD为二极管；VT为全控型电力电子器件；L为限流电感；R为氧化锌避雷器。VD₁、VD₂、VD₃和VD₄组成的整流桥与VT₁以及L₁共同构成电流抑制电路，用于抑制入侵的直流电流。将VT₂、VT₃反向并联后再与L₂串联构成旁路接地回路。将L₃与火花间隙串联后再与R并联构成旁路接地保护回路作为电容器的后备保护，其中，火花间隙可以作为R的后备保护。变压器振动监测系统和直流监测系统共同构成控制系统。

2.2 新型直流偏磁抑制方法工作流程

结合图5的结构原理，其工作流程如下。

2 具有双重保护的直流偏磁抑制措施研究

2.1 新型直流偏磁抑制措施原理

对以上抑制措施进行研究发现，中性点串联电容法在抑制直流偏磁的同时能够很好地保证经济性，且应用广泛。因此，以中性点串联电容法

1) 正常运行时,为了保证中性点有效接地,将接地开关 K_1 闭合,投切开关 K_2 断开。

2) 当振动监测系统监测到由于直流电流入侵而导致的振动现象或电流互感器 CT_1 检测到的直流电流数值超过设定值时闭合 K_2 ,先导通 VT_1 ,再断开 K_1 ,将直流抑制电路接入系统。此时电路只对 L_1 进行充磁。

3) 当变压器发生故障时会在短时间内产生数值较大的冲击性电流。为抑制冲击电流,将 L_1 投入故障回路限制冲击电流,同时电感对电流的延缓作用也为控制系统留下了充足的动作时间。当系统判断出流过中性线上的电流为故障电流时,将 VT_2 、 VT_3 导通,使得故障电流通过旁路接地回路流向大地,保证了变压器的有效接地和安全运行。为防止电容烧毁可以将 VT_1 关闭,退出电容。其双重保护功能体现在,当系统发生故障使得旁路回路不能正常导通时,由于故障电流的数值较大,会使旁路保护回路自动投入,保护隔离电容,确保系统的安全。

4) 电力系统中的故障一般为瞬时性故障,当故障消除后,先闭合 K_1 再断开 K_2 ,使系统恢复到正常工作状态。

本文提出的新型直流偏磁抑制措施的工作流程如图6所示。

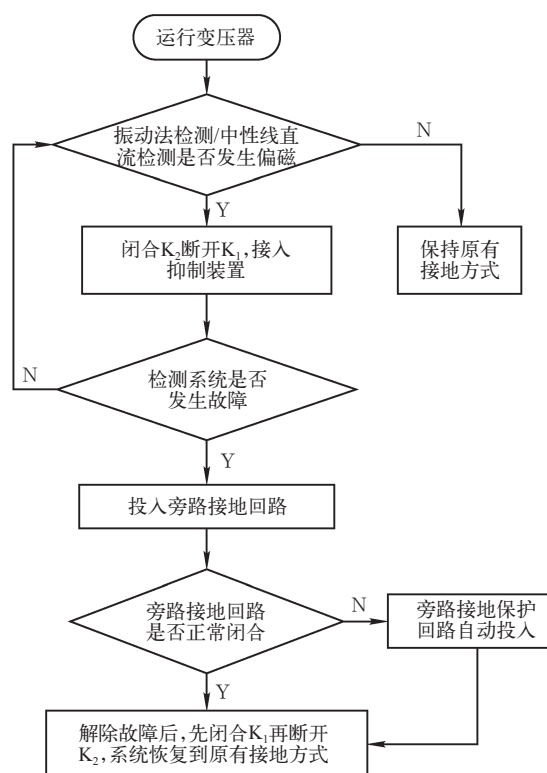


图6 工作流程图

Fig. 6 Workflow diagram

表 变压器参数

Tab. Transformer parameters

额定容量 /MV·A	电压等级 /kV	变压器 接线	额定电流 /A	空载损耗 /kW	空载电流 (%)
180	230/69	YNd11	451/ 1 506.1	115	0.3

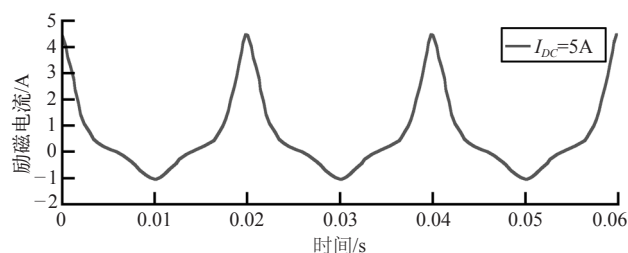
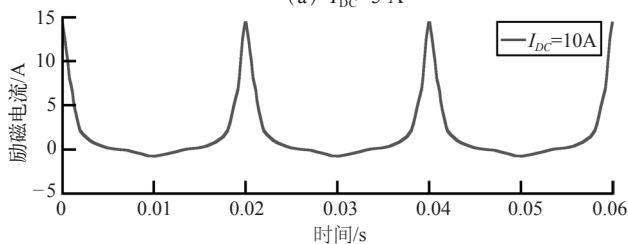
(a) $I_{DC}=5\text{ A}$ (b) $I_{DC}=10\text{ A}$

图7 无直流偏磁抑制措施时变压器励磁电流波形

Fig. 7 Excitation current waveform of transformer without DC bias suppression method

3 仿真分析

基于所提抑制措施的结构原理,依据实际SFZ11-180000/220型电力变压器利用PSCAD/EMTDC软件建立仿真模型,验证本文所提方法的有效性。变压器参数如下表所示。

3.1 隔直效果仿真分析

在变压器中性点处注入大小为5 A和10 A的直流电流,当没有采用直流抑制措施时计算所得的励磁电流仿真结果如图7所示(由于变压器的三相对称性,仅以A相为例)。

变压器正常运行时励磁电流呈现尖顶波,其中波峰、波谷区域表示变压器处于励磁饱和状态,零值附近区域表示励磁不饱和。发生直流偏

磁时,励磁饱和程度加深,励磁电流发生畸变,波形正半周幅值增大,负半周幅值减小,且随着所加直流电流的增加,波形畸变程度逐渐加剧。

将本文提出的直流抑制措施应用于该变压器模型,所得仿真结果如图8所示。

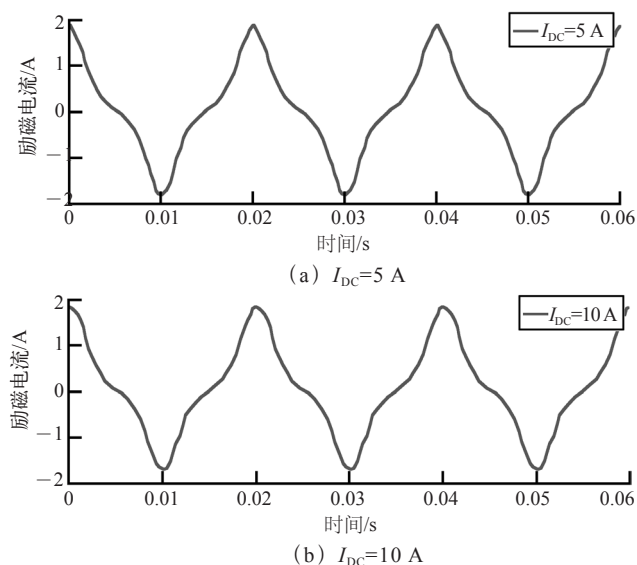


图8 使用直流抑制措施后变压器励磁电流波形

Fig. 8 Excitation current waveform of transformer with DC bias suppression method

随着所加直流电流的增大,励磁电流波形的变化并不明显,仍呈现对称的正弦波。表明本文所提出的直流抑制方法能够有效消除入侵直流电流,抑制变压器的直流偏磁效应,验证了该方法的正确性和有效性。

3.2 故障下的仿真分析

变压器正常运行时,变压器三相对称,三相电流幅值相等,相位相差 120° ,所以中性线电流为0。发生故障后,变压器三相对称性遭到破坏,中性线出现不平衡电流,通过仿真对隔直电容器的安全性进行验证。选择出现概率最大的变压器单相接地故障进行仿真分析。设定故障发生 $t=5$ s时,仿真结果如图9所示。

结合图9a、图9b可以看出,在 $t=5.1$ s时将旁路回路投入运行,此时流过旁路回路的电流波形与流过变压器中性点电流波形一致。表明流过中性点的故障电流都通过旁路回路直接流入了大地,保障了变压器的安全稳定运行。同时,由图

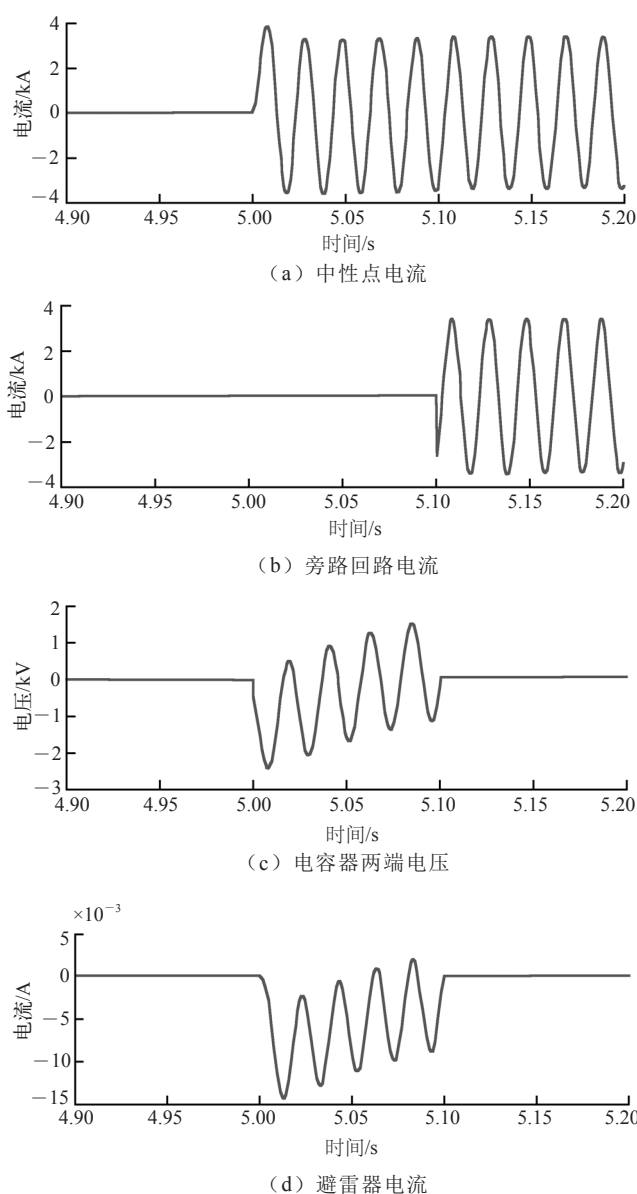


图9 单相接地故障下的仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform under single phase Grounding Fault

9c、图9d可知,电容器承受电压峰值为2.45 kV,小于额定电压,不会损坏电容器;避雷器流过的最大电流仅为0.015 A,可忽略不计。因此,利用本文所提方法能够有效保证电容器在故障环境下的安全运行。

4 结束语

本文通过对现有的直流偏磁抑制方法进行分析,提出一种针对旁路保护回路的双重保护方法。通过建立变压器直流偏磁仿真模型,验证

了本文所提方法的有效性。变压器发生故障时,通过投入旁路回路可以保护隔直电容器不被击穿,保证其安全性,实现双重保护。

参考文献

- [1] 王琨,李鹏,祁霄鹏,等. HVDC场合中直流互感器现场校验用的一种电流标准源研究[J]. 电气应用, 2018, 37(24): 12-15, 20.
- [2] 马硕. 基于振动特性的变压器直流偏磁检测及抑制措施研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [3] 杨涛,黄晓明,李忠,等. 变电站新型直流系统及其控制保护策略[J]. 电气应用, 2017, 36(24): 48-54.
- [4] 邹国平,姚晖,何文林,等. 溪洛渡—浙西 ± 800 kV特高压直流输电工程受端电网直流偏磁治理[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 543-550.
- [5] 董云龙,凌卫家,田杰,等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 169-175.
- [6] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSO A M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations-part II: experimental verification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 164-169.
- [7] 任瑞杰,王亚静,闫斌. 输电线路在线监测通信传输网络设计及实现[J]. 电力信息与通信技术, 2017, 15(3): 89-94.
- [8] PAN Z, ZHANG L, WANG X, et al. HVDC ground return current modeling in AC systems considering mutual resistances[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 165-173.
- [9] ALBERTSON V D, BOZOKI B, FEERO W E, et al. Geomagnetic disturbance effects on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 8(3): 1206-1216.
- [10] 彭平,周卫华,谢耀恒,等. 关于地铁杂散电流引起的变压器直流偏磁的分析与研究[J]. 变压器, 2017, 54(11): 26-30.
- [11] ABOURA F, TOUHAMI O. Effect of the GICs on magnetic saturation of asymmetric three-phase transformer[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(7): 1306-1314.
- [12] 蒯狄正,万达,邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 81-82.
- [13] 李晓萍,文习山,蓝磊,等. 单相变压器直流偏磁试验与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 33-40.
- [14] 李泓志,崔翔,刘东升,等. 直流偏磁对三相电力变压器的影响[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 88-96.
- [15] 肖本旺,王渝红,欧林,等. 直流偏磁抑制措施研究综述[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 209-216.

作者简介



朱洪防

朱洪防(1985—),男,工程师,从事变电设备运维检修。

(收稿日期:2019-10-24) **EA**