

自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器 保护原理及判据整定

罗隆福,李 勇,许加柱,李 季,刘福生
(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:通过分析自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器所具有的特殊的绕组布置与联结方式,阐述了基于变压器模型的新型换流变压器保护方案的基本原理。从该种变压器的基本数学模型出发,推导出了基于该原理的新型换流变压器的动作方程,拟定了该种变压器的保护方案并对判据加以整定。该判据通过比较所推导的动作方程两边的差值与所拟定的门槛值,用于可靠识别变压器内部故障。该保护方案摆脱了励磁涌流的影响,并且避开了变压器难以得到的内部参数。通过对该种变压器多种运行状态仿真计算验证了基于该保护方案的保护原理的正确性。

关键词: 变压器保护; 判据整定; 新型换流变压器; 励磁涌流

中图分类号: TM 772

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)02-0035-04

1 自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器

自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器是一种用于交直流输电系统的新型换流变压器,与传统换流变压器不同,其具有特殊的绕组布置结构与阻抗匹配关系。图 1 所示为该种变压器的原理接线图。由图可知,新型换流变压器副边绕组采用延边三角形接线,其中角接三角形绕组端部有抽头引出接辅助滤波兼无功补偿装置。这在接线方式上相当于将传统换流变压器原方网侧的无源滤波装置移到副方绕组中部,以利发挥自补滤波的作用,改善或消除传统无源滤波方式存在的不足^[1-2]。

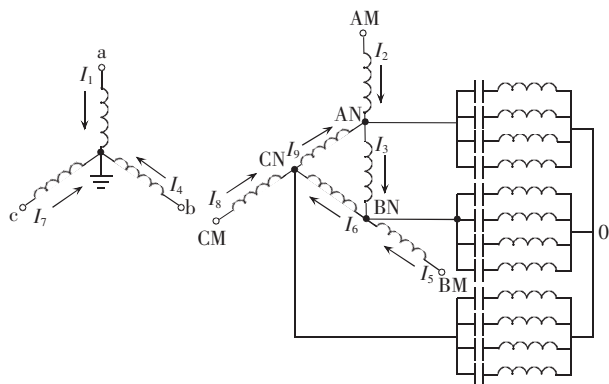


图 1 新型换流变压器原理接线图

Fig.1 Principle wiring diagram of new-type converting transformer

由于新型换流变压器副方绕组间的紧密配合,各绕组之间既有磁的联系,又有电的联系。特别是角接三角形绕组所需要的零阻抗设计特点,在一定程度上对变压器设计提出了严格的要求。相应地,

基于该变压器的继电保护方案也会因具体的变压器结构而与传统保护方案有很大不同。因此,研究新型换流变压器的新型保护方案就成为必须解决的重要技术问题。

通过分析新型换流变压器的基本数学模型,阐述了基于变压器模型的新型换流变压器保护方案的基本原理,并推导出基于该原理的变压器动作方程,拟定了相应的保护方案并对判据加以整定。最后,通过对新型换流变压器多种运行状态进行仿真计算验证基于此保护方案的保护原理的正确性。

2 基本原理

基于模型的变压器保护原理的基本思想是:一台完好的变压器无论在正常运行、存在励磁涌流、还是外部短路时都满足电路与磁路平衡方程;而在变压器内部故障时,由于结构改变导致参数改变,因此不再满足电路与磁路平衡方程^[3-8]。

新型换流变压器的保护原理正是基于该思想提出的。新型换流变压器单相模型如图 2 所示。根据变压器的电磁关系有^[9-10]

$$\begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{21} \frac{di_2}{dt} + M_{31} \frac{di_3}{dt} + W_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \\ u_2 &= r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_3}{dt} + W_2 \frac{d\Phi_m}{dt} \\ u_3 &= r_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{13} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} + W_3 \frac{d\Phi_m}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $u_1, u_2, u_3, i_1, i_2, i_3, r_1, r_2, r_3, L_1, L_2, L_3, M_{21}, M_{12}, M_{31}, M_{32}, M_{23}, W_1, W_2, W_3$ 分别为变压器一、二次侧的电压、电流、电阻、自感、互感和绕组匝数; Φ_m 为变压器主磁通。

假设变压器一次绕组与二次延边绕组、角接公

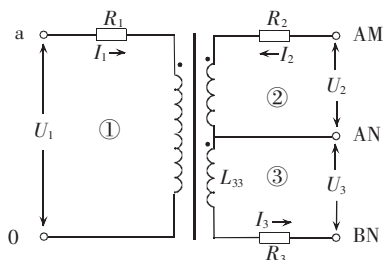


图 2 新型换流变压器(单相)

Fig.2 New-type converting transformer (single-phase)

共绕组的变比分别为 $K_{12} = W_1 / W_2$ 、 $K_{13} = W_1 / W_3$ ，由式(1)可得：

$$\begin{aligned} u_1 - K_{12} u_2 &= r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{21} \frac{di_2}{dt} + M_{31} \frac{di_3}{dt} - \\ &K_{12} \left(r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_3}{dt} \right) \\ u_2 - K_{13} u_3 &= r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_3}{dt} - \\ &K_{13} \left(r_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{13} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

在变压器正常运行、外部故障、过励磁或励磁涌流时，上式恒成立；在变压器发生内部故障时，由于变压器本身的结构参数发生变化，上式将不再成立。因此，可以通过判别式(2)是否成立来决定保护的动作行为。

3 动作方程及保护判据

3.1 动作方程的推导

新型换流变压器三相接线图如图 3 所示。下面将以这种接线的基本数学模型推导新型换流变压器相应的动作方程，并据此拟订保护判据。

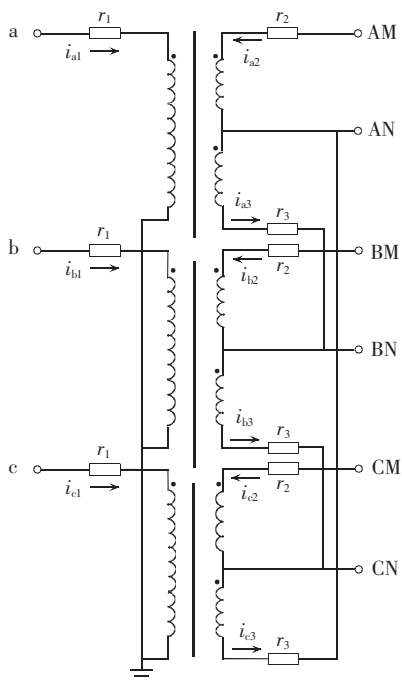


图 3 新型换流变压器(三相)

Fig.3 New-type converting transformer (three-phase)

根据变压器耦合电路原理，可得到 a、b、c 三相的关系如下：

$$\begin{aligned} u_{a1} &= r_1 i_{a1} + L_1 \frac{di_{a1}}{dt} + M_{21} \frac{di_{a2}}{dt} + M_{31} \frac{di_{a3}}{dt} + \frac{d\Phi_{ma}}{dt} \\ u_{b1} &= r_1 i_{b1} + L_1 \frac{di_{b1}}{dt} + M_{21} \frac{di_{b2}}{dt} + M_{31} \frac{di_{b3}}{dt} + \frac{d\Phi_{mb}}{dt} \\ u_{c1} &= r_1 i_{c1} + L_1 \frac{di_{c1}}{dt} + M_{21} \frac{di_{c2}}{dt} + M_{31} \frac{di_{c3}}{dt} + \frac{d\Phi_{mc}}{dt} \\ u_{a2} &= r_2 i_{a2} + L_2 \frac{di_{a2}}{dt} + M_{12} \frac{di_{a1}}{dt} + M_{32} \frac{di_{a3}}{dt} + \frac{d\Phi_{ma}}{dt} \\ u_{b2} &= r_2 i_{b2} + L_2 \frac{di_{b2}}{dt} + M_{12} \frac{di_{b1}}{dt} + M_{32} \frac{di_{b3}}{dt} + \frac{d\Phi_{mb}}{dt} \\ u_{c2} &= r_2 i_{c2} + L_2 \frac{di_{c2}}{dt} + M_{12} \frac{di_{c1}}{dt} + M_{32} \frac{di_{c3}}{dt} + \frac{d\Phi_{mc}}{dt} \\ u_{a3} &= r_3 i_{a3} + L_3 \frac{di_{a3}}{dt} + M_{13} \frac{di_{a1}}{dt} + M_{23} \frac{di_{a2}}{dt} + \frac{d\Phi_{ma}}{dt} \\ u_{b3} &= r_3 i_{b3} + L_3 \frac{di_{b3}}{dt} + M_{13} \frac{di_{b1}}{dt} + M_{23} \frac{di_{b2}}{dt} + \frac{d\Phi_{mb}}{dt} \\ u_{c3} &= r_3 i_{c3} + L_3 \frac{di_{c3}}{dt} + M_{13} \frac{di_{c1}}{dt} + M_{23} \frac{di_{c2}}{dt} + \frac{d\Phi_{mc}}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

式中，a、b、c 三相各符号所代表的物理含义与上述单相模型相一致，且有 $M_{12} = M_{21}$ 、 $M_{13} = M_{31}$ 、 $M_{23} = M_{32}$ 。将参数归算到一次侧，可得：

$$\begin{aligned} u_{a1} - u_{b1} + u'_{b2} - u'_{a2} &= r_1 (i_{a1} - i_{b1}) + \frac{x_1}{\omega} \frac{d(i_{a1} - i_{b1})}{dt} - \\ &r'_2 (i'_{a2} - i'_{b2}) - \frac{x'_2}{\omega} \frac{d(i'_{a2} - i'_{b2})}{dt} + (m'_{13} - m'_{23}) \frac{di_{mbc}}{dt} \\ u_{b1} - u_{c1} + u'_{c2} - u'_{b2} &= r_1 (i_{b1} - i_{c1}) + \frac{x_1}{\omega} \frac{d(i_{b1} - i_{c1})}{dt} - \\ &r'_2 (i'_{b2} - i'_{c2}) - \frac{x'_2}{\omega} \frac{d(i'_{b2} - i'_{c2})}{dt} + (m'_{13} - m'_{23}) \frac{di_{mbc}}{dt} \\ u_{c1} - u_{a1} + u'_{a2} - u'_{c2} &= r_1 (i_{c1} - i_{a1}) + \frac{x_1}{\omega} \frac{d(i_{c1} - i_{a1})}{dt} - \\ &r'_2 (i'_{c2} - i'_{a2}) - \frac{x'_2}{\omega} \frac{d(i'_{c2} - i'_{a2})}{dt} + (m'_{13} - m'_{23}) \frac{di_{mbc}}{dt} \\ u'_{a2} - u'_{b2} + u'_{b3} - u'_{a3} &= r'_2 (i'_{a2} - i'_{b2}) + \frac{x'_2}{\omega} \frac{d(i'_{a2} - i'_{b2})}{dt} - \\ &r'_3 (i'_{a3} - i'_{b3}) - \frac{x'_3}{\omega} \frac{d(i'_{a3} - i'_{b3})}{dt} + (m'_{12} - m'_{13}) \frac{di_{mab}}{dt} \\ u'_{b2} - u'_{c2} + u'_{c3} - u'_{b3} &= r'_2 (i'_{b2} - i'_{c2}) + \frac{x'_2}{\omega} \frac{d(i'_{b2} - i'_{c2})}{dt} - \\ &r'_3 (i'_{b3} - i'_{c3}) - \frac{x'_3}{\omega} \frac{d(i'_{b3} - i'_{c3})}{dt} + (m'_{12} - m'_{13}) \frac{di_{mbc}}{dt} \\ u'_{c2} - u'_{a2} + u'_{a3} - u'_{c3} &= r'_2 (i'_{c2} - i'_{a2}) + \frac{x'_2}{\omega} \frac{d(i'_{c2} - i'_{a2})}{dt} - \\ &r'_3 (i'_{c3} - i'_{a3}) - \frac{x'_3}{\omega} \frac{d(i'_{c3} - i'_{a3})}{dt} + (m'_{12} - m'_{13}) \frac{di_{mca}}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i_{mab} &= i_{a1} - i_{b1} + i'_{a2} - i'_{b2} + i'_{a3} - i'_{b3} \\ i_{mbc} &= i_{b1} - i_{c1} + i'_{b2} - i'_{c2} + i'_{b3} - i'_{c3} \\ i_{mca} &= i_{c1} - i_{a1} + i'_{c2} - i'_{a2} + i'_{c3} - i'_{a3} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} x_1 &= \omega(L_1 - m'_{12} - m'_{13} + m'_{23}) \\ x'_2 &= \omega(L'_2 - m'_{12} - m'_{23} + m'_{13}) \\ x'_3 &= \omega(L'_3 - m'_{13} - m'_{23} + m'_{12}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 i_{mab} 、 i_{mbc} 、 i_{mca} 为新型换流变压器三相差动电流；

x_1, x_2', x_3' 为变压器单相一次侧绕组与二次侧延边绕组、角接公共绕组等值电抗(归算至一次侧)。

式(4)即是所推导的新型换流变压器动作特性方程。在变压器正常运行、励磁涌流、外部故障时,式(4)中的 6 个等式完全成立,且前 3 个等式中的 $(m'_{13}-m'_{23})$ 和后 3 个等式中的 $(m'_{12}-m'_{13})$ 应分别为同一值;在变压器发生内部故障时,式(4)中的 6 个等式则不成立,而且前 3 个等式计算的 $(m'_{13}-m'_{23})$ 和后 3 个等式计算的 $(m'_{12}-m'_{13})$ 会有较大差别。这些是制定新型换流变压器保护判据的依据。

3.2 保护判据

根据所推导的新型换流变压器动作特性方程可制定相应的变压器保护判据。

判据 1 当差动电流大于阈值时,利用 $(m'_{13}-m'_{23})$ 和 $(m'_{12}-m'_{13})$ 的估算值,计算式(4)中的 6 个方程等式两边的差值,如果等式两边的差值超过阈值,判定变压器发生内部故障,保护跳闸。该判据用来识别较严重的变压器内部故障。

判据 2 当差动电流大于阈值时,利用式(4)分别计算 $(m'_{13}-m'_{23})$ 与 $(m'_{12}-m'_{13})$ 的差值,如果 $(m'_{13}-m'_{23})$ 或者 $(m'_{12}-m'_{13})$ 的差值超过所设定的阈值,则判定变压器发生内部故障,保护跳闸。该判据在判据 1 的基础上进一步识别了变压器内部的轻微故障。

4 仿真验证

为了验证上述新型换流变压器保护原理及判据的正确性,利用动态仿真工具 Matlab/Simulink 中的电力系统工具箱 PSB,建立了图 1 所示新型换流变压器的仿真模型,通过电压测量模块与电流测量模块采集该变压器一、二次侧的端口电压、电流波形,并通过微分模块、增益模块等数学模块计算动作特性

方程组式(4)中 6 个等式的差值。

仿真所用新型换流变压器(原理变压器)单相参数为:额定容量 17.913 4 kV·A;一次侧绕组额定电压 220 V、等值电抗 0.437 2 Ω;二次侧公共绕组额定电压 196.702 5 V、等值电抗 -0.000 532 Ω;二次侧延边绕组额定电压 113.566 2 V、等值电抗 0.113 5 Ω。参照文献[3]中的保护判据,取阈值为 $0.05 U_{IN}=11\text{ V}$ 。

4.1 空载合闸

图 4 为新型换流变压器在 0.05 s 时空载合闸的动态仿真曲线。图 4(a)中 u_1, u_2, u_3 分别为变压器 A 相一次侧绕组电压与二次侧延边绕组、公共绕组电压;图 4(b)(c)分别为动态特性方程式(4)中前 3 个等式与后 3 个等式两边的差值。可见,在空载合闸时,差值均小于所设定的阈值 11 V,变压器保护不会发生误动。

4.2 内部故障

图 5 为新型换流变压器在 0.05 s 时空载合闸,在 0.1 s 时 A 相二次侧延边绕组 10 % 匝间短路,在 0.15 s 时内部故障切除全过程的动态仿真曲线。由图可见,由于延边绕组在 0.1 s 时发生内部故障,此时所计算出的动态特性方程式(4)前 3 个等式两边的差值大于阈值,在 0.15 s 故障切除后,其差值小于阈值。从而验证了保护原理及判据能可靠地识别新型换流变压器的内部故障。

4.3 外部故障

图 6 为新型换流变压器在 0.05 s 时空载合闸,在 0.1 s 时 A 相一次侧出线端口开路,在 0.15 s 时出线端口合闸时的动态仿真曲线。由图可知,在变压器外部发生故障时,所计算出的动态特性方程式(4)中前 3 个等式与后 3 个等式两边的差值均小于所设定的阈值。变压器保护在发生外部故障时不会误动。

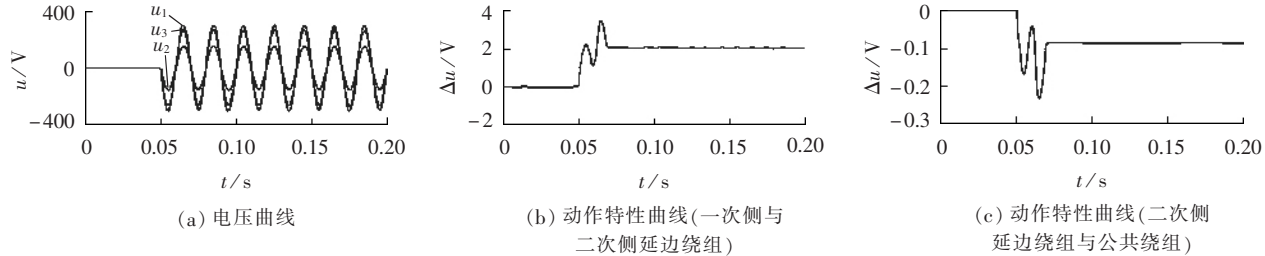


图 4 空载合闸时的仿真曲线

Fig.4 Simulation curves of no - load closing

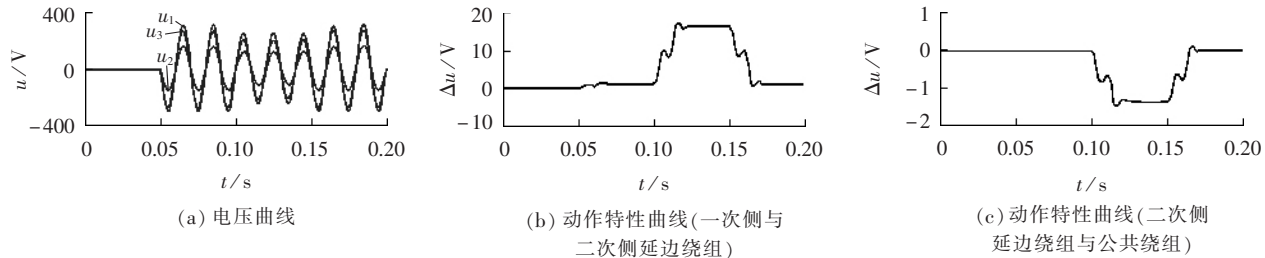


图 5 内部故障时的仿真曲线

Fig.5 Simulation curves of internal fault

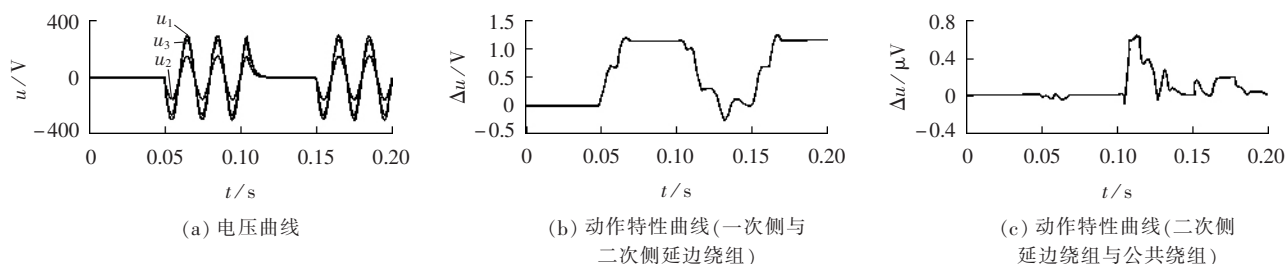


图6 外部故障时的仿真曲线

Fig.6 Simulation curves of external fault

5 结论

通过分析自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器独特的绕组联结方式,利用变压器耦合电路原理,推导了该变压器的动作特性方程,阐述了基于变压器模型的变压器保护原理,并据此拟订了相应的保护判据。该保护原理考虑了变压器励磁特性,从根本上摆脱励磁涌流影响。通过推导的动作特性方程可知该原理避开了变压器难以得到的内部参数,实现简单。通过对新型换流变压器在各种工况下的运行状态进行暂态仿真验证了该保护原理及判据的正确性。

参考文献:

- [1] 罗隆福,刘福生. 自耦补偿和谐波屏蔽换流变压器及其应用前景[J]. 大众用电,2005,21(7):26-28.
LUO Long-fu, LIU Fu-sheng. Auto-compensator and harmonics shade converter transformer and its application prospect [J]. Popular Utilization of Electricity, 2005, 21(7): 26-28.
- [2] 罗隆福,李季,许加柱,等. 基于新型换流变压器的谐波治理研究[J]. 高压电器,2006,42(2):96-98.
LUO Long-fu, LI Ji, XU Jia-zhu, et al. Study on harmonic treatment based on new-type converter transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(2): 96-98.
- [3] 韩正庆,高仕斌,李群湛. 基于变压器模型的新型变压器保护原理和判据[J]. 电网技术,2005,29(5):67-71.
HAN Zheng-qing, GAO Shi-bin, LI Qun-zhan. A novel transformer model based protective principle for transformer and its criteria [J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 67-71.
- [4] 王增平,徐岩,王雪,等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):54-58.

- WANG Zen-g-ping, XU Yan, WANG Xue, et al. Study on the novel transformer protection principle based on the transformer model [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 54-58.
- [5] 韩正庆,高仕斌,刘淑萍. 基于模型的 Scott 变压器保护原理研究[J]. 铁道学报,2005,27(4):42-46.
HAN Zheng-qing, GAO Shi-bin, LIU Shu-ping. Study on model based protection scheme for the Scott balanced transformer [J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(4): 42-46.
- [6] 汤蕴璆,史乃. 电机学[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [7] 马丁J·希思科特. 变压器实用技术大全[M]. 王晓莺,译. 北京:机械工业出版社,2004.
- [8] INAGAKI K, HIGAKI M, MATSUI Y, et al. Digital protection method for power transformers based on an equivalent circuit composed of inverse inductance [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(4): 1501-1510.
- [9] KEZUNOVIC M, GUO Y. Modeling and simulation of the power transformer faults and related protective relay behavior [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 44-50.
- [10] 王维俭. 变压器保护运行不良的反思[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(10): 1-3.
WANG Wei-jian. Consideration on the improper operation of transformer protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(10): 1-3.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

罗隆福(1962-),男,湖南常德人,教授,博士研究生导师,中国电机工程学会高级会员,主要从事现代电器设备的设计、优化,新型换流变压器的研制及对应的高压直流输电新理论研究(Email: llf@hnu.cn);

李勇(1982-),男,河南信阳人,博士研究生,主要从事基于新型换流变压器的直流输电系统新理论及谐波抑制与无功补偿研究(Email: goodliyang@hotmail.com)。

Protection principle of auto-compensator and harmonic shade converting transformer and its criteria setting

LUO Long-fu, LI Yong, XU Jia-zhu, LI Ji, LIU Fu-sheng

(Electrical and Information Engineering College, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: By analyzing the special winding layout and coupling mode of auto-compensator and harmonic shade converting transformer, the basic principle of protection scheme for new-type converting transformer based on the transformer model is expounded. Its action equation is deduced from its basic mathematics model and the criteria setting of protection scheme is given. The difference between two sides of action equation and the given threshold value are used to reliably identify the internal fault of transformers. The scheme gets rid of the influence of excitation inrush current and avoids the difficulty to get internal parameters of transformers. The simulative calculation of various transformer operating states, the correctness of the proposed scheme and its criteria are verified.

This project is supported by Important Science and Technology Foundation of Hunan Province(05GK1002-1).

Key words: transformer protection; criterion setting; new-type transformer; excitation inrush current