

基于感应电压的 SCOTT 三相 - 两相平衡 变压器保护原理研究

卢涛¹, 韩正庆²

(1. 西南交通大学峨眉校区, 四川 峨眉山 614202; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 在建立 SCOTT 平衡变压器电压回路方程的基础上, 提出了一种基于感应电压的 SCOTT 三相 - 两相平衡变压器的保护原理, 该原理能够避免二次谐波闭锁的比率制动差动保护的缺点。利用 Matlab/ Simulink 工具, 进行了计算机仿真, 仿真结果表明该文提出的原理能够正确地区分变压器内部故障和励磁涌流。

关键词: SCOTT 平衡变压器; 内部故障; 励磁涌流; 感应电压

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)22-0025-04

0 引言

变压器保护的关键是正确区分励磁涌流与内部故障, 目前应用最多的是二次谐波制动的比率电流差动保护^[1-3]。随着变压器铁心结构的改变、硅钢片性能的改善、容量的增大, 励磁涌流中二次谐波含量在逐渐下降^[1], 变压器内部故障时, 并联电容补偿装置对故障点放电又使得差动电流发生畸变, 增大了差动电流中二次谐波的含量^[4]。这就使基于二次谐波制动的比率电流差动的变压器保护将遇到“安全性”与“可靠性”的矛盾。

本文将变压器看成一个“黑箱”, 从研究该“黑箱”的感应电压入手进行分析^[5]。当变压器外部故障、正常负荷、励磁涌流时, “黑箱”的结构没有发生改变, 变压器原、次边的感应电压比始终等于匝比; 而在内部故障时, “黑箱”的结构发生了改变, 变压器原、次边的感应电压比不再等于匝比。

1 理论基础

以单相变压器为例, 有如下电压平衡方程

$$\begin{cases} e_1 = u_1 - R_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} \\ e_2 = u_2 - R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: e_1 、 e_2 分别为单相变压器原、次边的感应电压; u_1 、 u_2 分别为变压器原、次边的电压; i_1 、 i_2 分别为变压器原、次边的电流; R_1 、 R_2 分别为变压器原次边绕组电阻; L_1 、 L_2 分别为变压器绕组原次边的漏感。

显然, 由式(1), 在正常运行、励磁涌流、外部故障时, 有

$$e_1 - \frac{N_1}{N_2} e_2 = 0 \quad (2)$$

而在变压器内部故障(接地故障、匝间短路)时, 由于变压器结构的改变, 有

$$e_1 - \frac{N_1}{N_2} e_2 \neq 0 \quad (3)$$

2 基于感应电压的 SCOTT 平衡变压器保护原理

2.1 电压平衡方程

定义如下参数, u_A , u_B , u_C 和 i_A , i_B , i_C 分别为三相侧三相电压和电流; u , u 和 i , i 分别为两相侧两相电压和电流; r_A , L_A 分别为 座变压器高压侧绕组的电阻和漏感; r_{BC} , L_{BC} 为 座变压器高压侧绕组的电阻和漏感; r , L , r , L 分别为 和 座变压器低压侧绕组的电阻和漏感; ϕ_{mA} , ϕ_{mBC} 分别为 和 座变压器的工作磁通。

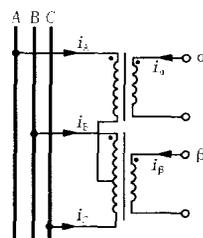


图1 SCOTT 变压器

Fig. 1 SCOTT transformer

根据 SCOTT 平衡变压器的电磁关系, 有

$$\begin{cases} u_{AO} = r_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{2} N_1 \frac{d\phi_{m\Delta}}{dt} \\ u = r i + L \frac{di}{dt} + N_2 \frac{d\phi_{m\Delta}}{dt} \\ u_{BO} = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + \frac{1}{2} N_1 \frac{d\phi_{mBC}}{dt} \\ u_{OC} = -r_C i_C - L_C \frac{di_C}{dt} + \frac{1}{2} N_1 \frac{d\phi_{mBC}}{dt} \\ u = r i + L \frac{di}{dt} + N_2 \frac{d\phi_{mBC}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

因为, $r_B = r_C, L_B = L_C = L_{BC}/2, L = K^2 L$, 座单相变压器变比 $K = N_1/N_2$, 所以

$$\begin{cases} e_1 = u_{BC} - r_B(i_B - i_C) - L_B \frac{d(i_B - i_C)}{dt} \\ e_2 = u - r i - \frac{1}{K^2} L \frac{di}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)有

$$e_1 - \frac{N_1}{N_2} e_2 = u_{BC} - Ku - r_B(i_B - i_C) + Kr i - L_B \frac{d(i_B - i_C)}{dt} + \frac{1}{K} L \frac{di}{dt} \quad (6)$$

x_1 为座单相变压器的短路电抗, 则 $x_1 = \sqrt{2L_B + L}$, 令 $2L_B = L = x_1/(2)$, 有

$$e_1 - \frac{N_1}{N_2} e_2 = u_{BC} - Ku - r_B(i_B - i_C) + Kr i + \frac{x_1}{2} \frac{di}{dt} - \frac{x_1}{4} \frac{d(i_B - i_C)}{dt} \quad (7)$$

又因为

$$u_{AO} = \frac{1}{2} (u_{AC} + u_{AB} + u_{BO} - u_{OC}) \quad (8)$$

所以有

$$\frac{1}{2} (u_{AC} + u_{AB}) = r_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} - \frac{1}{2} [r_B(i_B + i_C) + L_B \frac{d(i_B + i_C)}{dt}] + \frac{\sqrt{3}}{2} N_1 \frac{d\phi_{m\Delta}}{dt} \quad (9)$$

由式(4)和式(9)有

$$e_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{N_1}{N_2} e_2 = \frac{1}{2} (u_{AC} + u_{AB}) - \frac{\sqrt{3}}{2} Ku - (r_A + \frac{1}{2} r_B) i_A + \frac{\sqrt{3}}{2} Kr i - L_A \frac{di_A}{dt} - \frac{1}{2} L_B \frac{d(i_B + i_C)}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{2} KL \frac{di}{dt} \quad (10)$$

x_2 为座变压器的短路电抗, 则 $x_2 = \sqrt{L_A + L}$, $L = 3K^2L/4$, 令 $L_A = L = x_2/(2)$, 有

$$e_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{N_1}{N_2} e_2 = \frac{1}{2} (u_{AC} + u_{AB}) - \frac{\sqrt{3}}{2} Ku - (r_A + \frac{1}{2} r_B) i_A + \frac{\sqrt{3}}{2} Kr i - \frac{x_2}{2} \frac{di}{dt} \quad (11)$$

$$r_B) i_A + \frac{\sqrt{3}}{2} Kr i - \frac{1}{8} (x_1 + 4x_2) \frac{di_A}{dt} + \frac{x_2}{\sqrt{3}K} \frac{di}{dt} \quad (11)$$

式(7)和(11)是构成基于感应电压比 SCOTT 平衡变压器的基础。

2.2 动作方程

考虑到电压、电流互感器,电阻、电感参数存在误差和用梯形面积代替微分计算将带来误差,在正常运行、励磁涌流和外部故障时,式(2)也会不满足。必须考虑一定的阈值,即

$$e_1 - \frac{N_1}{N_2} e_2 \geq K_{zd} U_e \quad (12)$$

式中: K_{zd} 为电压百分比整定值(仿真中取 5%); U_e 为变压器原边额定电压。

在内部故障时,由于式(12)左边为一正弦波,在一个周期内会出现过零点而不满足式(12),可能引起保护的拒动。为了避免这种情况的发生,并不要求每个采样点都满足式(12),可以设计一个计数器 n 进行计数,只要在一个周期内 $n \geq 2N/3$ (N 为每个周期的采样点数),即出口动作于断路器跳闸。

3 保护动作行为仿真

3.1 仿真条件

以大秦线迁西变电所 #1 牵引变压器为仿真对象,该 SCOTT 变压器的技术参数如下,额定容量: 75/37.5/37.5 MVA; 额定电压: 110/55 kV; 短路电抗: $x_1 = 34.848$, $x_2 = 26.136$; 绕组电阻: $r_A = 1.452$, $r_B = r_C = 0.968$, $r = 0.484$, $r = 0.484$ 。每个周期采样 100 点,则整定点数为 67 点。

考虑参数误差时,取高、低压侧 PT 误差为 0.2%; 高压侧 CT 误差为 10%; 低压侧 CT 误差为 30%; 电阻、电抗误差为 0.5%。

3.2 励磁涌流仿真

1) 和座变压器剩磁为零,当座变压器的合闸角为零时将变压器空载投入,仿真波形如图 2 所示。以下各图中:(a)表示变压器原、次边电压、电流波形;(b)表示不考虑参数误差时保护的动作为;(c)表示考虑参数误差时保护的动作为;(b)、(c)中直线表示整定点数,曲线表示计数点数。

2) 座变压器剩磁为 0.9,座变压器剩磁为 -0.9,当座变压器合闸角为 30° 时将变压器空载投入,仿真波形如图 3 所示。

从图 2、3 可以看出:由于原、次边感应电压比等于匝比,所以励磁涌流时落入动作区内的点数很少,并且参数误差对保护动作为几乎没有影响。励磁

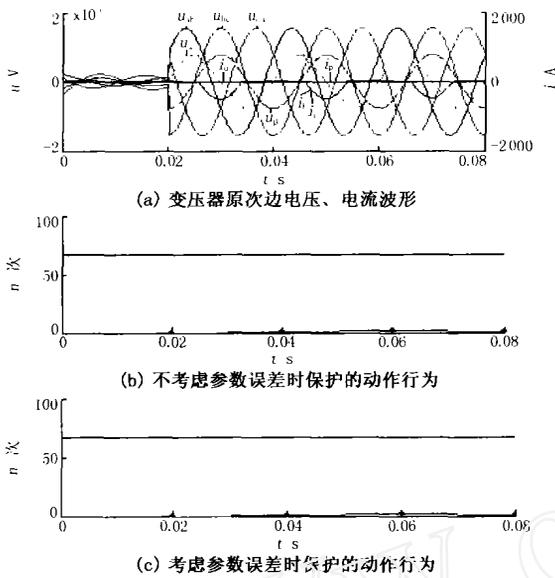


图2 剩磁与合闸角为零时的励磁涌流仿真波形

Fig. 2 Inrush current waves when there are no residual flux and initial angle

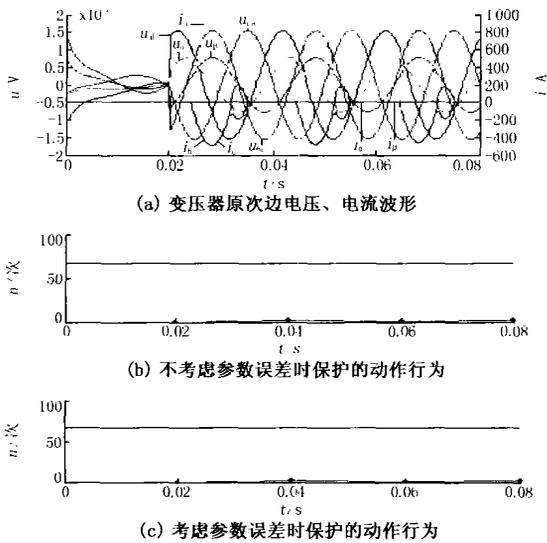


图3 剩磁与合闸角不为零时的励磁涌流仿真波形

Fig. 3 Inrush current waves when residual flux and initial angle are not zero

涌流仿真说明该原理能够保证励磁涌流时保护可靠不动作。

3.3 内部故障仿真

- 1) 内部 10% 短路故障时的仿真波形如图 4 所示。
- 2) 内部 20% 短路故障时的仿真波形如图 5 所示。

从图 4、5 可以看出:内部故障时,由于原、次边

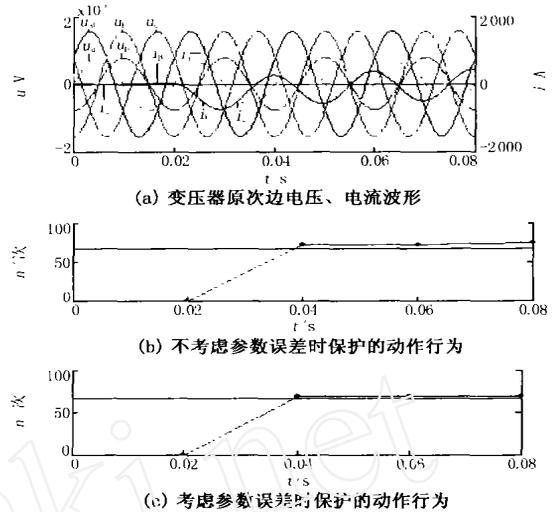


图4 内部 10% 短路故障的仿真波形

Fig. 4 Simulation results of 10% internal fault

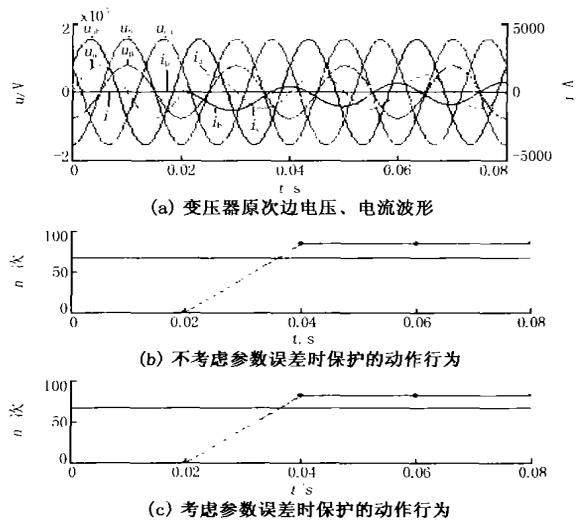


图5 内部 20% 短路故障的仿真波形

Fig. 5 Simulation results of 20% internal fault

感应电压比不再等于匝比,所以内部故障时落入动作区内的点数超过整定点数,并且动作点数随着内部短路的严重程度而增多;保护将在内部故障发生 1 周波后动作于跳闸。

4 结论

通过上面的理论研究和仿真试验,可以得到如下结论:

- 1) 变压器内部故障时,由于绕组匝数的改变,其原、次边感应电压比将不再等于匝比;而励磁涌流时,原、次边感应电压比等于匝比;这是构成基于感应电压比的 SCOTT 平衡变压器保护的基础。

2) 仿真结果表明,基于感应电压比的 SCOTT 平衡变压器保护原理能够有效地区分内部故障与励磁涌流;动作时间至少为一个周波;当考虑各种参数的误差时,保护动作的灵敏度较不考虑误差时要低。

3) 可以预见,在变压器外部故障时,如果电流互感器严重饱和,采用式(12)的判据将会造成保护的误动作,有必要对式(12)的判据进行优化。限于篇幅,将另文讨论。

参考文献:

- [1] 王维俭(WANG Wei-jian). 电力主设备继电保护原理与应用(Protective Principles and Application of Main Electrical Equipment) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1998.
- [2] Guzmán A, Zocholl S, et al. A Current-based Solution for Transformer Differential Protection, Part I: Problem Statement [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16 (4): 485-491.

- [3] Guzmán A, Zocholl S, et al. A Current-based Solution for Transformer Differential Protection, Part II: Relay Description and Evaluation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (4): 886-894.
- [4] 丁明,沈军(DING Ming, SHEN Jun). 列波兰变压器功率差动保护的探究(Study of the Power Differential Protection of Le-Blanc Transformer) [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)(Journal of Hefei University of Technology, Natural Science), 2000, 23(5): 636-641.
- [5] Kang Y C, Lee B E, et al. A Transformer Protective Relaying Algorithm Using the Ratio of Induced Voltages[A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. 109-114.

收稿日期: 2004-07-22; 修回日期: 2004-08-17

作者简介:

卢涛(1965-),女,讲师,从事电力系统继电保护与自动化领域的教学与研究工作;E-mail: lutao1965@163.com

韩正庆(1977-),男,博士研究生,从事电力系统继电保护与自动化领域的教学与研究工作。

Study of a novel protective scheme based on induced voltages for SCOTT three-phase to two-phase balanced transformer

LU Tao¹, HAN Zheng-qing²

(1. Enei Branch, Southwest Jiaotong University, Emeishan 614202, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on voltage equations of SCOTT three-phase to two-phase balanced transformer, this paper proposes a novel protective scheme based on induced voltages. The proposed scheme can overcome the disadvantages of the percentage restrained current differential protection with secondary harmonic lock. The simulation is carried out by Matlab/Simulink, and the results indicate that the proposed scheme can correctly identify internal faults and inrush current.

Key words: SCOTT balanced transformer; internal fault; inrush current; induced voltage

(上接第 19 页 continued from page 19)

- [9] Auckl D W, Pickup I E D, Shuttleworth R. NOVAL Approach to Alternator Field Winding Interturn Fault Detection [J]. IEE Proc — Gener, Transm and Distrib, 1995, 142 (2): 97-102.

作者简介:

马宏忠(1962-),男,博士,副教授,研究方向为电力设备状态故障分析、状态监测、故障诊断、测控技术等;

李之昆(1975-),女,硕士研究生,研究方向为电力设备故障诊断;E-mail: llqun@163.com

彭钱(1979-),男,工程师,主要研究方向为电力系统输变电。

收稿日期: 2004-03-09; 修回日期: 2004-04-14

Genetic programming for diagnosing turn-to-turn short fault of generator rotor windings

MA Hong-zhong¹, LI Zhi-kun¹, PENG Qian²

(1. Hehai University, Nanjing 210098, China; 2. Xiangxi Power Company, Jishou 416000, China)

Abstract: A new method based on genetic programming (GP) for simulating the relationship of the field current of generator with the voltage, active current and reactive current is presented. EMF will be constant on a fixed condition whereas the exciting current increases to maintain the balance of magnetic potential when the rotor winding shorted. Then the relationship of field current with voltage, active current and reactive current can reflect the rotor state. Using the terminal variables as independent variables, GP can automatically create a function to reflect their relation. The result of a computation example shows that the method is effective.

Key words: genetic programming; magnetic potential balance; field current