

# 变压器微机保护新算法的研究及其应用

张传利 黄益庄 王国兴 清华大学电机系 北京 (100084)

**【摘要】** 简要介绍了传统的变压器保护算法,并指出了该算法存在的问题;利用变压器数学模型和物理模型,采用电流和电压两种参量,详细分析了变压器空载合闸和内部故障时负序差动功率比率的特点,提出了变压器负序差动功率比率保护算法。动态模拟实验表明了该算法的可行性。

**【关键词】** 变压器 数学模型 励磁涌流 负序差动功率比率

## 1 引言

电力变压器是电力系统中十分重要的电气设备,作为电力系统自动化重要组成部分的变压器保护,对保障变压器的安全,具有十分重要的作用。但从实际运行情况看,变压器保护的正确动作率仅为60%~70%。随着大容量变压器应用的日益增多以及电力系统其他因素的影响,传统的变压器保护算法无法完全适应电力系统新的要求,有必要进行变压器保护新算法的研究。

## 2 传统变压器保护算法及其存在的问题

目前,电力系统广泛采用二次谐波制动原理的差动保护作为变压器保护的主保护。变压器励磁涌流三相中有一相二次谐波分量与基波分量的比值较大;而内部故障时,该比值较低,因此可以对空载合闸加以制动。但是,随着电网电压等级的提高和系统规模的扩大,变压器容量的增大和制造技术的提高,二次谐波制动原理的差动保护面临以下问题:

(1)对于大型变压器,由于在高压输电系统中,长输电线路的分布电容效应十分明显。因此当变压器内部严重故障时,可能使短路电流中的谐波分量明显增加,有可能引起二次谐波制动的差动保护延时动作。

(2)电力系统中,为提高系统稳定性常常采取无功就地补偿措施。在低压侧出口差动范围内故障时,反馈电流含有幅值较大的谐波成分,作为差流的一部分对差动保护有影响,可能会使差动保护延时动作。

从以上分析可以看出,鉴别空载合闸和内部故障是实现变压器差动保护的关键所在。要进一步改善变压器差动保护的動作特性,必须在其它方面寻找突破口。

## 3 数字仿真

### 3.1 建立数学模型的理论依据

为研究变压器差动保护的動作特性,以保证电力变压器的安全、可靠运行,必须深入了解变压器运行的机理。但在实际情况下,无法对实际的变压器进行冲击和故障实验。利用电力变压器的数学模型,以研究变压器的运行状况,是一种可取的方法。在建立变压器的数学模型时,考虑以下因素:

- (1)变压器为双绕组、三相变压器组;
- (2)联结组别为 Ydn,11 方式;
- (3) B-H 关系采用 Frolich 曲线;
- (4)对大容量低耗变压器,不计及涡流影响;
- (5)计及输电线路分布电容的影响。

### 3.2 磁路中磁导 $\rho$ 的推导

由于变压器铁磁材料的作用,磁感应强度  $B$  和磁场强度  $H$  呈非线性关系,这也是变压器空载合闸时产生较大数字励磁涌流的主要原因。

这里,采用 Frolich 经验公式模拟 B-H 曲线:

$$B = \frac{H}{C + b |H|}$$

$$\text{其中, } c = \frac{1}{u_i u_b}, \quad b = \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{u_i}}}{B_s}$$

$B$ ——磁感应强度  $H$ ——磁场强度  
 $u_i$ ——铁心材料的相对磁导率  $u_b$ ——真空中的相对磁导率  $B_s$ ——饱和磁感应强度  $u$ ——磁导率  
 $A$ ——铁心的有效截面积  $l$ ——磁路的有效长度

$$\text{则,磁导 } \rho = \frac{uA}{L}, \text{ 化简,并整理得到: } \rho = \frac{uA}{L} = \frac{A(1 - b |B|)^2}{L \cdot C}$$

### 3.3 变压器励磁涌流数学模型方程

如图1为仿真三相变压器组的物理模型。各电量定义如下:

$u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$ ——电源三相电压

$u_{a2}, u_{b2}, u_{c2}$ ——变压器二次侧三相电压

$R_1$ ——线路电阻  $L_1$ ——线路电感

$C_e$ ——线路分布电容

$r_{a1}, r_{b1}, r_{c1}$ ——一次绕组电阻

$L_{a1}, L_{b1}, L_{c1}$ ——一次绕组电感

$r_{a2}, r_{b2}, r_{c2}$ ——二次绕组电阻

$L_{a2}, L_{b2}, L_{c2}$ ——二次绕组电感

$u_{a1}, u_{b1}, u_{c1}$ ——变压器一次侧三相端电压

$i_{la}, i_{lb}, i_{lc}$ ——变压器一次侧线路电流

$i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}$ ——变压器一次侧绕组相电流

$i_{a2}, i_{b2}, i_{c2}$ ——变压器二次侧绕组相电流

$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ ——磁路中的主磁通

$A$ ——铁心有效截面积

$l$ ——铁心磁路的有效长度

$N_1$ ——原边线圈匝数

$N_2$ ——副边线圈匝数

对于A相,利用基本电路和磁路定律,变压器两侧分别有:

$$u_{ca} = \frac{R_1}{2} i_{la} + \frac{L_1}{2} \frac{di_{la}}{dt} + r_{a1} i_{a1} + L_{a1} \frac{di_{a1}}{dt} + N_1 \frac{d\varphi_a}{dt} \quad (1)$$

$$u_{a2} = r_{a2} i_{a2} + L_{a2} \frac{di_{a2}}{dt} + N_2 \frac{d\varphi_a}{dt} \quad (2)$$

三相变压器组由三个单相变压器组成,每相磁路独立。由磁路的基尔霍夫第二定律,有

$$N_1 i_{a1} + N_2 i_{a2} = R_{ma} \varphi_a \quad (3)$$

$R_{ma}$ ——磁路的磁阻

整理,得到:

$$\frac{d\varphi_a}{dt} = \rho_a N_1 \frac{di_{a1}}{dt} + \rho_a N_2 \frac{di_{a2}}{dt} \quad (4)$$

同理,对于B相和C相,有

$$u_{cb} = \frac{R_1}{2} i_{lb} + \frac{L_1}{2} \frac{di_{lb}}{dt} + r_{b1} i_{b1} + L_{b1} \frac{di_{b1}}{dt} + N_1 \frac{d\varphi_b}{dt} \quad (5)$$

$$u_{b2} = r_{b2} i_{b2} + L_{b2} \frac{di_{b2}}{dt} + N_2 \frac{d\varphi_b}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{d\varphi_b}{dt} = \rho_b N_1 \frac{di_{b1}}{dt} + \rho_b N_2 \frac{di_{b2}}{dt} \quad (7)$$

$$u_{cc} = \frac{R_1}{2} i_{lc} + \frac{L_1}{2} \frac{di_{lc}}{dt} + r_{c1} i_{c1} + L_{c1} \frac{di_{c1}}{dt} +$$

$$N_1 \frac{d\varphi_c}{dt} \quad (8)$$

$$u_{c2} = r_{c2} i_{c2} + L_{c2} \frac{di_{c2}}{dt} + N_2 \frac{d\varphi_c}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{d\varphi_c}{dt} = \rho_c N_1 \frac{di_{c1}}{dt} + \rho_c N_2 \frac{di_{c2}}{dt} \quad (10)$$

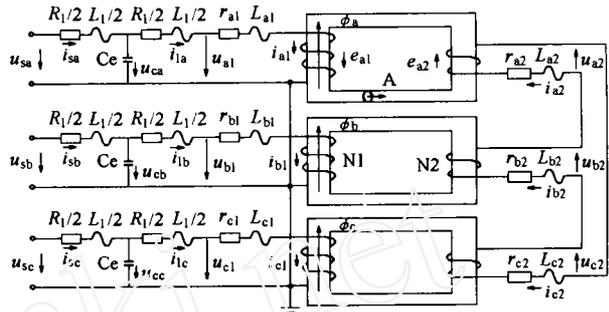


图1 三相变压器组空载合闸物理模型

其中, $\rho_a, \rho_b, \rho_c$ 分别为三相磁路各自的磁导。由于B-H的非线性关系,使得 $\rho_a, \rho_b,$ 和 $\rho_c$ 为非常数。

变压器二次侧为三角形接线,且变压器空载,因此有: $i_{a2} = i_{b2} = i_{c2}$

设 $r_{a2} = r_{b2} = r_{c2}$ ,则有

$$u_{a2} + u_{b2} + u_{c2} = 3r_{a2} i_{a2} + 3L_{a2} \frac{di_{a2}}{dt} +$$

$$N_2 \left( \frac{d\varphi_a}{dt} + \frac{d\varphi_b}{dt} + \frac{d\varphi_c}{dt} \right) = 0 \quad (11)$$

对变压器一次侧,应用基本电路定律,得到

$$u_{sa} = \frac{L_1}{2} \frac{di_{sa}}{dt} + \frac{R_1}{2} i_{sa} + u_{ca} \quad (12)$$

$$u_{sb} = \frac{L_1}{2} \frac{di_{sb}}{dt} + \frac{R_1}{2} i_{sb} + u_{cb} \quad (13)$$

$$u_{sc} = \frac{L_1}{2} \frac{di_{sc}}{dt} + \frac{R_1}{2} i_{sc} + u_{cc} \quad (14)$$

$$i_{sa} = i_{la} + C_e \frac{du_{ca}}{dt} \quad (15)$$

$$i_{sb} = i_{lb} + C_e \frac{du_{cb}}{dt} \quad (16)$$

$$i_{sc} = i_{lc} + C_e \frac{du_{cc}}{dt} \quad (17)$$

$$\text{设定 } \varphi_a = A \cdot B_a \quad \varphi_b = A \cdot B_b$$

$$\varphi_c = A \cdot B_c$$

重新整理上述各式,变压器空载合闸时的数字仿真方程组可以写成矩阵形式:

$$L\xi = R\zeta + U$$

该微分方程可采用Runge-Kutta方法求其数字解。而变压器一次侧端电压可由以下各式求出:

$$u_{a1} = r_{a1} i_{a1} + L_{a1} \frac{di_{a1}}{dt} + N_1 \frac{d\varphi_a}{dt}$$

$$u_{bl} = r_{bl} i_{bl} + L_{bl} \frac{di_{bl}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_b}{dt}$$

$$u_{cl} = r_{cl} i_{cl} + L_{cl} \frac{di_{cl}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_c}{dt}$$

变压器差动范围内故障数学模型的建立,方法上是类似的,所不同的只是故障边界条件的差异。

前已述及,在鉴别变压器励磁涌流时,使用单一一种电量,如电流或电压量,信息含量少,局限性较大;同时利用多种电量,如电流和电压量鉴别励磁涌流,信息含量较多,有利于较全面地反映变压器运行工况,应是发展的方向。因为,从根本上说,由于非线性励磁特性,变压器的电压和电流并非线性相关,而是系统中两组独立的变量,必须同时应用电压量和电流量才能完全表征出变压器的状态。因此,我们采用可同时反映电压量和电流量的负序差动功率比率,研究鉴别变压器励磁涌流的新算法。

负序差动功率定义为:  $S_{op} = \frac{S_2}{S_1}$

其中,  $S_2 = U_2 \cdot \Delta I_2$      $S_1 = U_1 \cdot \Delta I_1$

- $S_{op}$ —— 负序差动功率比率
- $U_2$ —— 变压器一次侧负序电压
- $I_{op}$ —— 负序差动电流比率
- $\Delta I_2$ —— 变压器负序差动电流
- $S_2$ —— 负序差动功率
- $U_1$ —— 变压器一次侧正序电压
- $S_1$ —— 正序差动功率
- $\Delta I_1$ —— 变压器正序差动电流

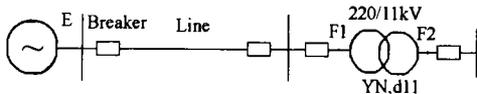


图2 数字仿真系统接线示意图

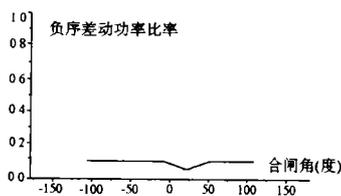


图3 变压器空载合闸时,负序差动功率比率随合闸角的变化情况

(对不同剩磁,取最大负序差动功率比率)

数字仿真系统接线如图2所示,从数字仿真的结果可以得出以下结论:

(1) 同时利用变压器端电压和差流两种信息量,使得负序差动功率比率在空载合闸和内部故障

时呈现十分明显的特征(见图3和图4)。这是把变压器空载合闸和内部故障可靠地区别开来的主要依据。

(2) 变压器负序差动功率只是采用基波分量,因而受系统参数的相对影响较小,因此,用其鉴别空载合闸和内部故障较之二次谐波具有明显的优越性。

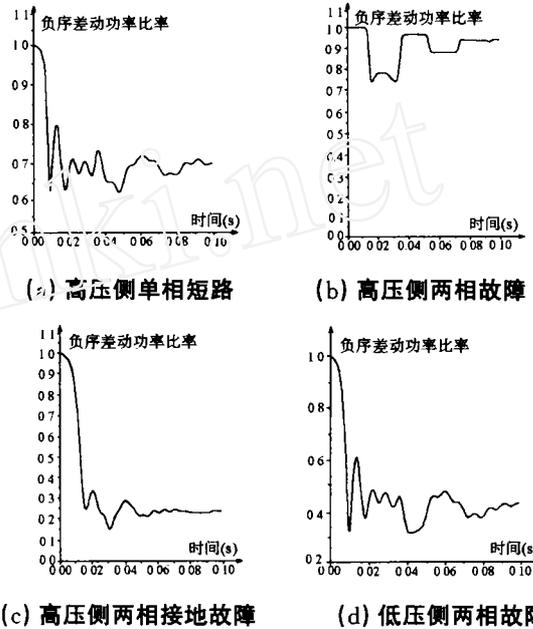


图4 差动区内故障时负序差动功率比率的变化

## 4 变压器负序差动功率比率保护算法以及动模实验

### 4.1 变压器负序差动功率比率保护算法

变压器负序差动功率比率保护算法包括两部分:

(1) 鉴别外部和内部故障仍采用传统比例制动方法。

(2) 区分空载合闸和内部不对称故障采用负序差动功率比率。

若  $S_{op} = \frac{u_2 \cdot \Delta i_2}{u_1 \cdot \Delta i_1} \times 100 > \delta$ , 则判别为内部故障; 否则判别为空载合闸。

### 4.2 动态模拟实验

为了进一步验证该保护算法的正确性,我们设计了变压器负序差动功率比率保护装置样机,并在清华大学国家重点实验室进行了动态模拟实验(定值  $\delta = 0.05$ )。

(1) 变压器空载合闸和外部故障

多次进行空载合闸(负序差动功率见图5(a))

和外部短路,保护装置可靠制动。

### (2) 内部轻微故障

高压侧绕组 A 相和低压侧绕组 AB 相发生匝间短路时,负序差动功率比率的变化如图 5(b) 和 5(c) 所示,保护装置在一个周波内迅速动作。

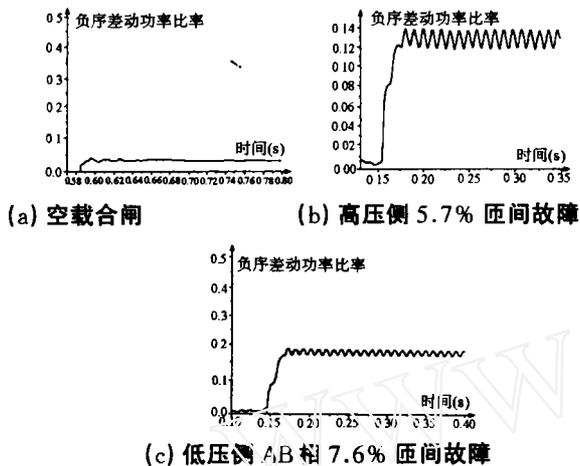


图 5 变压器空载合闸和匝间故障时负序差动功率比率变化情况

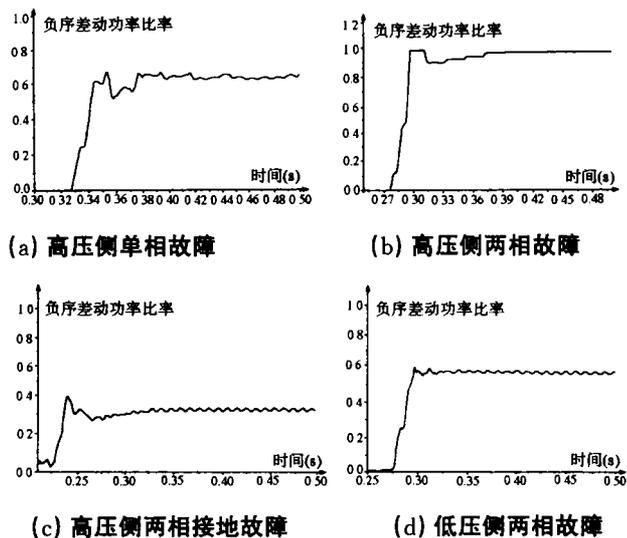


图 6 内部严重故障时,负序差动功率比率的变化

### (3) 内部严重故障

从图 6 可以看出,对于严重内部故障, $S_{op} > \delta = 0.05$ ,该原理的保护可以在一个周期内迅速反应

而快速动作。

### (4) 结论

变压器差动功率比率保护装置在动模实验室进行了动态模拟实验。在模拟变压器上的实际运行结果表明:

①对轻、重内部故障,差动功率原理保护都能正确动作,动作灵敏度比传统保护高;

②外部故障和空载合闸时,差动功率原理保护可靠不动作;

③空载合闸于故障时,保护可以快速动作。

④对于三相短路,负序差动功率比率保护无法反应,需增加附加判据(负序差动电流比率制动判据),以便同变压器空载合闸状态区别开来。

## 5 结论

本文把负序差动功率比率引入变压器保护中,力求克服传统的变压器保护算法存在的不足。利用该算法研制出的样机,经过动态模拟实验,表明所设计的软件和硬件是正确的。自然,一种新算法要投入实际应用,还需要进一步的验证。

### 参考文献

- 王祖光. 高性能的变压器差动保护. 电力系统自动化, 1982, (6): 18~26.
- Armando Guzman, Daqing Hou. Transformer Modeling Applied to Differential Protection, CCECE'96.
- 王广延. 电力系统元件保护原理. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- Liu Pei etc. Improved Operation of Differential Protection of Power Transformers for Internal Faults. IEEE Transactions On Power Delivery, 1992, 7(4): 1912~1919.

收稿日期: 1998—11—06

张传利 男, 1967 年生, 博士, 从事变电站综合自动化及电力系统继电保护研究。

黄益庄 女, 1939 年生, 教授, 主要从事计算机在电力系统控制中的应用的研究及微机继电保护研究。

王国兴 男, 1975 年生, 硕士生, 主要从事继电保护及人工智能在电力系统中的应用研究。

## APPLICATION AND RESEARCH ON NEW ALGORITHM FOR MICROCOMPUTER-BASED TRANSFORMER RELAYING PROTECTION

Zhang Chuanli, Huang Yizhuang, Wang Guoxing (Dept. E. E., Tsinghua University, 100084)

**Abstract** The traditional transformer protection is introduced briefly, and the existing problems are pointed out in this paper. The RDNSP (Ratio of Differential Negative Sequence Power) is analyzed in detail when the transformer is energized and inner faults occur. On the basis of this, a new algorithm for transformer protection using RDNSP is presented. The simulating test shows that the presented algorithm is reasonable.

**Keywords** Transformer Mathematical Model Rush Current RDNSP