

变压器差动保护二次谐波制动判据的仿真研究

吕珍, 岳蔚, 刘沛

(华中科技大学电力工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 利用二次谐波制动原理防止励磁涌流造成差动保护误动作是目前最普遍应用的方法。通过建立合理的变压器模型, 在不同的运行情况下对现行的各种二次谐波制动判据进行仿真, 比较, 得出了一些有益的结论。

关键词: 二次谐波制动; 励磁涌流; 差动保护

中图分类号: TM77 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2003)06-0069-04

1 引言

变压器在电力系统安全运行中起着重要作用。差动保护作为主保护最关键的问题就在于励磁涌流引起的保护误动作, 长期以来二次谐波原理被用于制动励磁涌流。常规采用的励磁涌流方式会出现故障变压器空投时非故障相闭锁故障相的现象, 导致变压器保护延时动作。不能迅速切除故障, 降低超高压系统中变压器保护的性能。而这个缺陷可以在变压器保护微机化后通过合理选择谐波制动比、制动逻辑或增补辅助判据得到较大改善。

2 二次谐波制动比的几种计算方法

目前常用的二次谐波制动比有以下几种计算方法^[1]:

(1) 谐波比最大相制动

$$\max(I_{d2}/I_{d1}, I_{db2}/I_{db1}, I_{dc2}/I_{dc1}) \geq K_{set} \quad (1)$$

将式(1)记为判据一。即利用三相中二次谐波与基波比的最大值来制动。

(2) 按故障相制动

$$I_{d2}/\max(I_{d1}, I_{db1}, I_{dc1}) \geq K_{set} \quad (2)$$

将式(2)记为判据二。即利用差流基波最大相的二次谐波与基波的比值来制动。

(3) 分相制动

$$\min(I_{db2}/I_{db1}, I_{dc2}/I_{dc1}) \geq K_{set} \quad (3)$$

将式(3)记为判据三。即每相差流中二次谐波与基波的比值都超过定值时制动。

(4) 综合相制动

$$\frac{\max(I_{d2}, I_{db2}, I_{dc2})}{\max(I_{d1}, I_{db1}, I_{dc1})} \geq K_{set} \quad (4)$$

将式(4)记为判据四。即利用三相差流二次谐

波的最大值与基波的最大值之比来制动。

式(1)~(4)中, I_{d1} 、 I_{db1} 、 I_{dc1} 分别为三相差流基波, I_{d2} 、 I_{db2} 、 I_{dc2} 分别为三相差流二次谐波。

为更清楚地说明问题, 本文在引入权系数的基础上从数学角度进行比较。首先设三相差流自身二次谐波与基波的比值分别为 k_a, k_b, k_c , 即:

$$k_m = I_{dm2}/I_{dm1} \quad (m = a, b, c) \quad (5)$$

同时令 I_{dmax} 为三相基波电流的最大值, 取三相的权系数分别为

$$\gamma_m = I_{dm1}/I_{dmax} \quad (m = a, b, c) \quad (6)$$

观察三相的权系数可以发现, 三者分母相同, 因而权系数的大小实质上反映了三相差流基波的大小。

对谐波比最大相制动方式和分相制动方式其谐波比计算实质上是取:

$$\gamma_a = \gamma_b = \gamma_c = 1$$

此时的谐波制动比分别为:

$$K = \max(k_a \gamma_a, k_b \gamma_b, k_c \gamma_c) = \max(k_a, k_b, k_c)$$

$$K = \min(k_a \gamma_a, k_b \gamma_b, k_c \gamma_c) = \min(k_a, k_b, k_c)$$

对于谐波比最大相制动方式而言, 由于三相系数均取为 1, 实际上就是不考虑各相差流基波幅值大小对谐波比选取的影响, 利用此方式闭锁保护虽然可以保证励磁涌流时保护不误动, 但对于超高压系统中的大型变压器而言, 由于其励磁涌流衰减时间长, 故在空合于故障时保护动作延时相当长, 可达到 100 ms 以上, 动模实验最恶劣的情况甚至达到 200 ms; 另一方面, 超高压系统中故障时谐波含量较大, 由于最大相制动不考虑各相基波幅值的大小对谐波比选取的影响, 在变压器发生轻微故障(如小匝数匝间短路), 差流基波幅值不大时, 二次谐波含

量就很容易达到闭锁定值,致使保护动作延时。

对于分相制动方式,与最大相制动方式相同,也不考虑各相差流基波幅值大小对谐波比选取的影响,虽然可以使保护迅速动作,但当有一相或以上的差流谐波比过小不能闭锁保护时,容易造成误动。

对于按相制动方式,其谐波比的选取实质上是选权系数最大的相的谐波比进行制动,即先比较 γ_a 、 γ_b 、 γ_c ,取三者最大值所在的相的谐波比来判别。利用此方式闭锁保护,由于考虑了三相差流基波幅值大小对谐波比的影响,故可在较大程度上改善最大相制动方式动作延时的不足;但另一方面,由于只以一相的谐波比来制动,当变压器发生对称性涌流时,其对称性涌流相二次谐波含量较小;同时仿真计算与动模实验均表明,在某些初始条件下,变压器发生励磁涌流时,可能同时有两相谐波比达不到制动定值,这种情况的存在使得采用故障相制动可能导致变压器励磁涌流时保护误动作。

对综合相制动方式,其谐波比的选取实质上是选各相谐波比与权系数乘积的最大值:

$$K = \max(k_a \gamma_a, k_b \gamma_b, k_c \gamma_c) = \frac{\max(I_{da2}, I_{db2}, I_{dc2})}{\max(I_{da1}, I_{db1}, I_{dc1})}$$

利用此方式闭锁保护,由于既考虑了差流基波幅值大小对谐波比选取的影响(通过权系数 γ_a 、 γ_b 、 γ_c),又考虑了实际三相谐波比含量的数值大小,因而在保证变压器产生励磁涌流不误动的前提下,提高了变压器保护的速动性。因为即使在空合于故障变压器的情况下,虽然涌流相含有较大的二次谐波,并且可能衰减很慢,但由于故障相的存在使得谐波比计算时分母保持一较大值,且基本上不随励磁涌流的衰减而减小,故使得谐波比迅速减小至闭锁定值以下而保证故障快速切除。

3 建模与仿真

本文采用 ATP 仿真软件对变压器进行分析与研究,接线图如图 1。变压器铁心的磁滞效应是一个非常复杂的过程,其变化规律主要依据变压器局部磁环特性。结合 ATP 仿真程序提供的功能,在磁滞效应的处理上,考虑了变压器铁心的主磁环特性。变压器的饱和与磁滞效应是通过在线性变压器模型的相应节点添加非线性电感来实现的^[2]。

文献[3]、[4]提供了一种适用于分析和研究超高压(500 kV)或特高压(750 kV)变压器保护性能的模式,这种模型能够模拟不同位置、不同类型的匝间短路故障。因此,本文采用这种变压器模型作为研

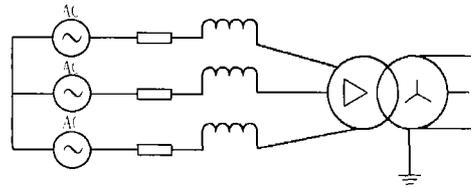


图 1 仿真试验接线图

Fig. 1 Connection of transformer simulation model

究的对象,来分析和仿真变压器内部故障。该模型可以用来较真实地仿真变压器励磁涌流。在用 Type-96 元件来模拟磁滞回线的情况下,仿真结果跟动模实验的结果是非常接近的。

具体模型为: $Y_0/\Delta-11$ 接线(高压侧 Y_0 接线,低压侧 Δ 接线);铁芯采用 Type-96 元件,即带磁滞回线的非线性电感模型;饱和磁密 $B_s = 1.15B_m$ 。各相剩磁为 $B_{ra} = 0.9B_m$, $B_{rb} = B_{rc} = -0.9B_m$;每周波采样 48 点。目前国内大型变压器差动保护中 15%~20%的制动比整定值是按照饱和磁通为 1.4 倍额定磁通幅值时合闸涌流的大小来考虑的,但由于变压器制造技术的提高和制造材料的改进,现代变压器的饱和磁通倍数经常在 1.2 到 1.3,甚至低至 1.15,因此仿真中取 $B_s = 1.15B_m$;合闸侧电源为无穷大,电源内阻抗取为 $0.01 + j0.06 \Omega$ 。

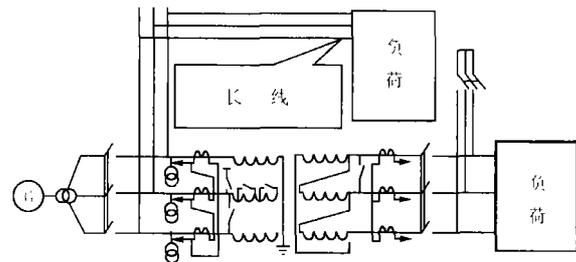


图 2 带长线系统仿真模型接线图

Fig. 2 Connection of transformer simulation model with long line

这里主要分析计算变压器 Δ 侧、Y侧不带故障空投; Δ 侧带故障空投以及带长线时内部各种故障情况(带长线的系统仿真模型接线图如图 2),用以比较以上几种判据速动性和可靠性。谐波的计算采用傅式算法,以合闸后第一个周波终点为时间起点,并逐点递推,以便观察谐波比随时间的变化关系。以下各图中 I_a 、 I_b 、 I_c 代表各相差流; K_{1max} 、 K_{2max} 、 K_{3max} 、 K_{4max} 代表四种不同判据的制动比曲线。以下给出了几种较典型的分析算例。

(1) Δ 侧不带故障空投

设 A 相合闸角为 30° ,在这种情况下图 3(a)为变压器 Δ 侧不带故障空投时的三相电流波形。

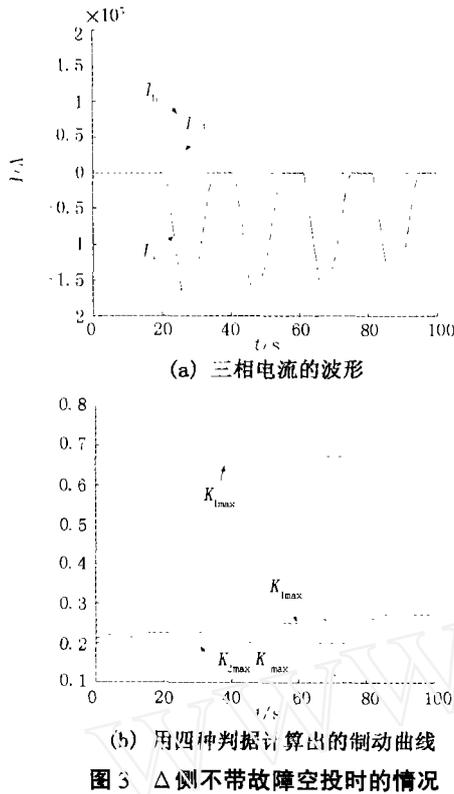


图3 Δ 侧不带故障空投时的情况

Fig.3 The case with no-fault and no-load closing on Δ side

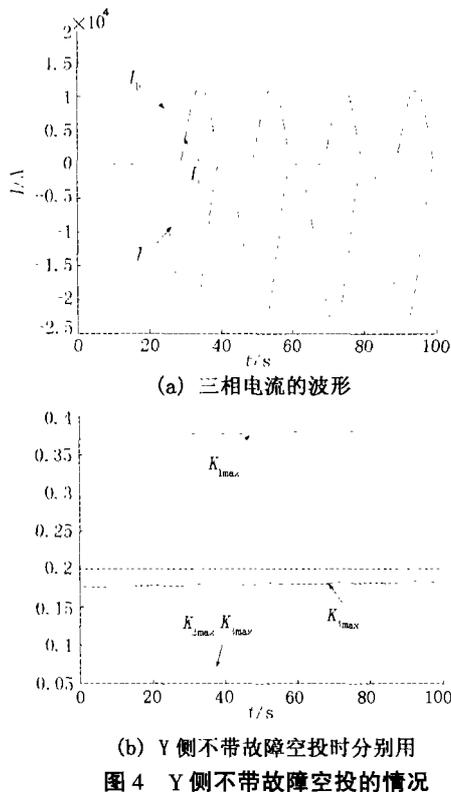


图4 Y侧不带故障空投的情况

Fig.4 The case with no-fault and no-load closing on Y side

(2) Y侧不带故障空投

变压器在Y/ Δ 接线情况下,Y侧空投时产生对称涌流的机会较大。由理论分析及录波证明,对称涌流仅会产生于一相差流中。为了研究励磁涌流最严重的情况,取A相合闸角 $\alpha_A = 30^\circ$ 。图4为 $\alpha_A = 30^\circ$ 时,Y侧不带故障空投的情况。

(3) Δ 侧带故障空投

图5为高压侧B、C两相短路时变压器 Δ 侧空投时的情况。

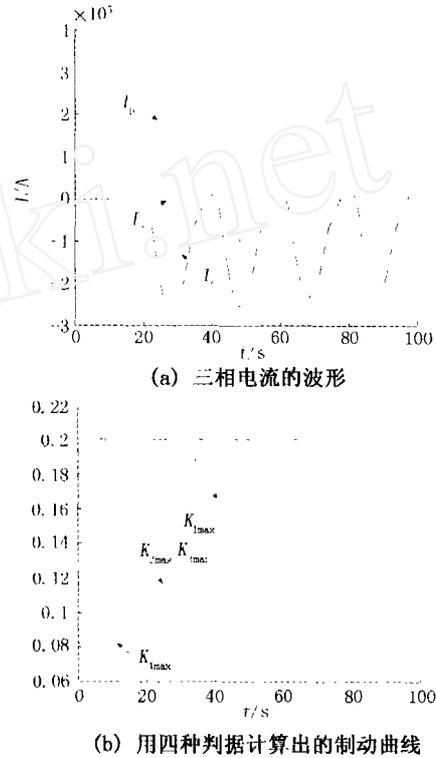


图5 Y侧B、C相短路, Δ 侧带故障空投时的情况

Fig.5 The case of colsing with no-fault and no-load closing on Δ side and phase BC short-circuit on Y side

(4) 带长线内部故障

图6是变压器带长线、高压侧发生短路、匝比为5%时的故障仿真结果。

4 仿真结果分析

设二次谐波制动比整定为20%。从上面的仿真结果可以看出:变压器 Δ 侧不带故障空投时,对二次谐波含量而言,四种判据图的变化趋势相同如(图3(b)),都随时间的推移而增大,这意味着励磁涌流衰减的过程中,基波比二次谐波衰减快(仅对此模型而言)。这时只有判据一可靠制动。判据二、三、四都可能误动。并且若变压器谐波制动定值得偏小,则出口需要的时间会更长。特别是判据二、三算出的谐波含量虽然也是随时间增加而增大,但是

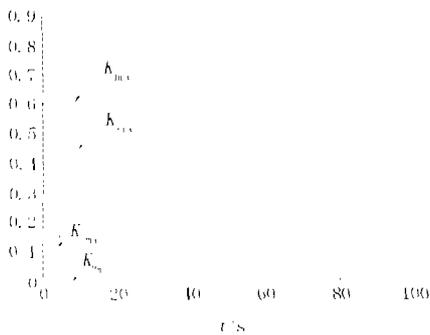


图6 带长线内部匝间故障时分别用四种判据计算出的制动曲线

Fig.6 Deactivation curves calculated by four schemes when turn-to-turn fault and model with long line

100 ms 以后依然达不到闭锁保护所需要的值。所以其可靠性最低。因此,△侧不带故障合闸时,判据一可靠性最高,判据四其次,判据二、三最差。

变压器 Y 侧不带故障空投时,对二次谐波含量而言,四种判据的变化趋势(图 4(b))与图 3(b)相同。但是只有判据一能够可靠制动励磁涌流。判据二、三、四都会造成差动保护误动。但是如果为了消除对称涌流的影响,采用单相制动三相即或逻辑,很可能造成变压器带故障合闸时的拒动或带长延时动作。

考虑了变压器△侧带故障空投时最严重的情况(图 5(b))。即在满足差动判据的前提下故障相短路电流尽量小,以便模拟出变压器带故障空投时保护的长延时动作过程。为此,将故障点设在非电源侧,利用变压器自身的电阻电感值来限制短路电流。图 5(a)为高压侧内部 B、C 两相短路变压器空投时的情况。判据一即使在谐波制动定值得偏小(如 15%~17%)的情况下,保护在 80 ms 以后都不一定能出口;判据二、三、四此时几乎是等效的:合闸后经过一个周波就能够判断出故障。综上所述,从保护的速动性来考虑,判据二、三最优,判据四次之,判据一最差。

变压器带长线内部故障时,由于电感和电容发生谐振,短路电流中的谐波含量会明显增加,从而给二次谐波制动比的整定带来了困难。在图 6 中可以看出,故障后一段时间内,利用判据一、三、四计算出的二次谐波含量都很大,且远大于谐波制动比。大概要维持 20 ms 以后,谐波含量才有可能小于谐波定值,保护才有可能出口。当谐波制动比小于 20%时,出口需要的时间会更长。因此带长线的变压器发生匝间故障时,二次谐波制动的判据除了判

据二外均有可能将故障电流误判为励磁涌流,从而闭锁保护。

5 结论

虽然三相涌流中可能有一相涌流的二次谐波成分小于 10%,但是至少会有一相涌流的二次谐波成分较大。因此,二次谐波仍然是励磁涌流的一个典型特征。对于 500 kV 超高压输电系统,特别是西北电网正在筹建的 750 kV 特高压系统,很可能将使用国外进口的大型电力变压器,这种变压器由于使用了高性能的铁芯,其磁滞的影响将大大减小。在使用时应适当降低二次谐波制动比整定值。

微机变压器差动保护中,谐波比最大相制动方式由于与模拟式保护一致,故延续传统的定值选取方法应能保证保护正常工作;综合相制动方式,其定值应该小于最大相谐波比。综合相制动方式制动比宜取为 15%~17%,以保证较好的综合性能。而对按相制动方式,其定值选取要仔细考虑。

二次谐波制动的变压器差动保护应用其效果是肯定的,但是对于二次谐波制动原理来说,无论采用那一种判据,均存在这方面或那方面的不足。因此实际应用中,应该寻找新的原理和依靠辅助判据来弥补二次谐波制动原理的不足,提高超高压变压器保护的综合性能。

参考文献:

- [1] 邱文征,陈德树. 两种励磁涌流二次谐波制动判据的比较[J]. 电力系统自动化设备,1998,(3):8-12.
- [2] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论(第一版)[M]. 北京:水利电力出版社,1991.
- [3] Mladen Kezunovic, Yong Guo. Modeling and Simulation of the Power Transformer Faults and Related Protective Relay Behavior[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000,15(1):44-50.
- [4] Bastard P, Bertrand P, Meunier M. A transformer model for winding fault studies[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994,9(2):690-699.

收稿日期: 2002-11-19

作者简介:

吕珍(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为变压器保护;

岳蔚(1977-),女,硕士研究生,研究方向为数字信号处理在电力系统中的应用;

刘沛(1944-),女,教授,博士生导师,研究领域为继电保护及变电站自动化。

(下转第 84 页)

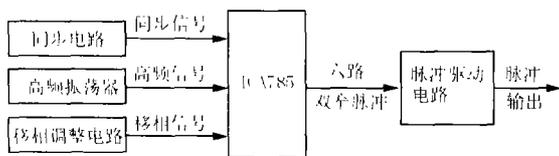


图6 高频脉冲触发电路原理方框图

Fig.6 The principle chart of high-frequency pulse trigger circuit

移相范围 $5^{\circ} \sim 175^{\circ}$, 完全可与数字式触发板相媲美, 通过移相调整电路既可实现自动控制, 又可通过 PLC (可编程控制器) 实现微机控制; 且成本低 (仅为数字式触发电路的四分之一), 抗干扰性强, 交流纹波小于 0.5 V 。在胜利油田几十座变电站和胜利油田海洋平台上运行二年多, 至今未出现任何问题。

参考文献:

- [1] 谭建成. 电机控制专用集成电路 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] 黄俊. 半导体变流技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.

收稿日期: 2002-12-09; 修回日期: 2003-03-11

作者简介:

张玉奎 (1967-), 男, 工程师, 从事电力系统继电保护及自动化工作;

陈元平 (1967-), 女, 工程师, 从事电力系统继电保护及直流操作电源的研究、开发工作;

李树君 (1966-), 男, 工程师, 从事电气传动产品的研制开发工作。

The improvement of silicon-controlled trigger circuit

ZHANG Yu-kui¹, CHEN Yuan-ping², LI Shu-jun³

(1. The Testing Center of Shengli Oilfield Electric Power Administration Parent Corporation, Dongying 257000, China;

2. Shengli Electrical Equipment Co., Ltd of Shengli Oilfield Electric Power Administration Parent Corporation, Dongying 257071, China;

3. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: This paper introduces the problems and self-advantages of analog trigger circuit comparing with digital trigger circuit. To the problems and self-advantages of analog trigger circuit, the corresponding improvement measures brought forward in the text improve the reliability of analog trigger circuit.

Key words: silicon-controlled; synchronization; pulse; trigger; drive

(上接第 72 页)

The simulation of the scheme of second harmonic restraint for power transformer

LV Zhen, YUE Wei, LIU Pei

(Department of Electric Power Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To avoid differential protection mal-operation's of a power transformer due to inrush currents, the scheme of second harmonic restraint is widely used. In this paper, the reasonable transformer model is established, some harmonic restraint criteria are emulated and compared for different situations, then some useful conclusions are given.

Key words: second harmonic restraint; inrush current; differential protection; power transformer

高压交联电缆要实行价格自律

近日, 中国电器工业协会电线电缆分会、电线电缆价格委员会、电线电缆反低价倾销监督办公室及 12 家行业重点企业的代表联合召开了全国高压交联电缆产品价格自律工作会议。会议公布了电线电缆价格委员会委托郑州电缆(集团)股份有限公司测算编制的《高压交联电缆产品建议价格表》, 企业代表共同签署了行业价格自律意向书。