

自适应变压器电流差动保护判据研究

余加霞¹, 张恒泰¹, 葛耀中², 何战虎¹, 负保记¹

(1. 西安西瑞保护控制设备有限责任公司研究所, 陕西 西安 710075; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了提高变压器电流差动保护的正确动作率, 通过对区内外短路时故障电流特性的分析研究, 提出了一种自适应变压器电流差动保护判据。对于变压器区外故障, 能自动增大差动保护制动系数, 提高区外故障的防卫度, 对于区内故障, 自动减小差动保护的制动系数, 提高区内故障差动保护的灵敏性。通过 RTDS 试验证明自适应判据对提高保护性能是有效的。

关键词: 变压器差动保护; 自适应差动保护; 制动系数

The research of the adaptive transformer current differential protection criterion

YU Jia-xia¹, ZHANG Heng-tai¹, GE Yao-zhong², HE Zhan-hu¹, YUN Bao-ji¹

(1. Xi'an Xirui Protection and Control CO.LTD, Xi'an 710075, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to improve the reliability of transformer current differential protection, this paper proposes a new adaptive transformer current differential protection criterion based on the analysis of electric characteristic when the transformer is in faults. It can automatically increase the brake coefficients when the external faults occur, while decrease them and improve the sensitivity of differential protection when the internal faults occur adaptively. At last, simulation on RTDS verifies the effectiveness of adaptive criterion.

This work is supported by the State Ministry of Science and Technology (No. 050461002).

Key words: transformer current differential protection; adaptive differential protection; the brake coefficients

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-115-05

0 引言

变压器电流差动保护具有简单可靠、灵敏度高和动作快速等一系列优点, 作为变压器主保护在电力系统中得到了广泛运用。但是在实际运行中由于励磁电流(涌流)、CT饱和及系统运行方式等影响, 目前变压器差动保护的動作正确率只有75%, 远不能满足变压器安全可靠运行的要求^[1]。因此, 进一步提高变压器电流差动保护的可靠性具有重要的理论意义和实用价值。

由电流差动保护的工作原理可知, 当变压器正常工作时, 其差动电流(动作电流)很小, 保护不会误动; 变压器区外故障时, 由于不平衡电流的影响, 差动电流比正常工作时较大, 但是制动电流也会增大, 根据比率制动式差动原理, 一般情况下保护也不会误动。但是, 由于区外短路时非周期分量、

其它谐波分量和CT饱和等一系列因素的影响, 差动电流可能会达到所设置的最小门槛, 若此时制动电流也较小, 尤其是切除外部故障时^[2], 差动保护可能会误动; 变压器区内故障时, 若差动电流较大, 保护能可靠动作, 但是如果变压器内部经过高阻接地, 其故障电流较小, 小于相应的制动电流, 则差动保护就会拒动。而电流差动保护的差动电流由故障点的电流大小决定, 它与系统的运行方式、故障类型、过渡电阻等因素有关, 差动电流可能会很大, 也可能很小, 我们无法控制。

由此可见, 电流差动保护能否可靠动作在很大程度上由其制动量来决定。因此, 在内部故障时, 为了保证保护灵敏可靠动作, 就必须减小制动量。反之, 在外部故障时, 为了躲过不平衡电流的影响, 使保护不会误动, 必须增大制动量。

基于上述观点, 本文提出了一种自适应电流差动保护动作判据, 对于变压器区外故障, 能自动增大差动保护制动系数, 提高区外故障的防卫度, 对

基金项目: 国家科技部攻关项目(050461002)

于区内故障，自动减小差动保护的制动系数，提高区内故障差动保护的灵敏性，分析结果表明，其性能结果均优于常规的电流差动保护判据。（注：本文所涉及到的曲线及动作特性方程的前提为已消除了变压器各侧幅值和相位的差异）。

1 常规差动保护原理及动作特性

常规比率差动动作特性方程^[3]（以两折线为例）：

$$\begin{cases} I_d > I_{set} & (I_{res} \leq I_g) \\ I_d > I_{set} + K_{bl} * (I_{res} - I_g) & (I_{res} > I_g) \end{cases} \quad (1)$$

其中： I_{set} 为差动电流的起动定值（可整定）； I_d 为差动电流； I_{res} 为制动电流； I_g 为拐点电流； K_{bl} 为可整定的制动曲线斜率； I_{max} 为故障相各侧中的最大电流。常规差动保护动作特性曲线如图 1 所示。

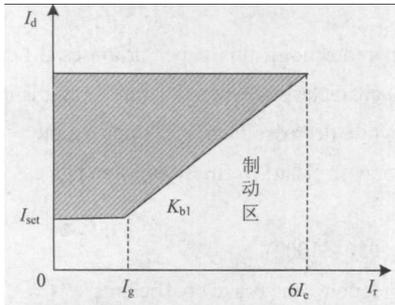


图 1 比率差动动作特性曲线

Fig.1 Characteristic curve of percent-ratio differential operation

动作电流和制动电流的计算方法如下：

$$\begin{cases} I_d = \sum_{i=1}^N I_i \\ I_{res} = \frac{1}{2} |I_{max} - \sum I_i| \end{cases}$$

无论被保护的变压器为几侧变压器，都有 I_{max} 为变压器最大的相电流， $\sum I_i$ 为除最大相电流以外其他相电流之和。

从式（1）可以看出，当 $I_{res} < I_g$ 时，比率差动保护不带制动作用；当 $I_{res} > I_g$ 时， I_{res} 由于其含有较大的负荷电流使得比率差动保护具有较大的制动作用。同时，当变压器区内故障 $I_d < I_{set}$ 时，差动保护也不能灵敏地动作，为解决这个问题，一般采用降低动作门槛值 I_{set} ，但是该方法可能引起区外故障切除时保护误动。

由此可见，这种常规的比率制动特性的差动保护已无法在保证变压器内部故障灵敏度的前提下解

决区外故障切除时保护的误动问题，或者解决了误动问题又不能满足变压器发生轻微内部故障的灵敏性问题。

为了解决这个问题，基于浮动门槛技术的故障分量比率制动特性的差动保护被提出^[3-5]。

故障分量比率制动特性方程：

$$\begin{cases} \Delta I_d > 1.25 \Delta I_{dT} + 0.2 I_n \\ \Delta I_d > 0.6 \Delta I_{res} & (\Delta I_{res} \leq 2 I_n) \\ \Delta I_d > -0.3 I_n + 0.75 \Delta I_{res} & (\Delta I_{res} > 2 I_n) \end{cases} \quad (2)$$

式中：

$$\Delta I_d = |\Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots + \Delta I_n|$$

$$\Delta I_{res} = \max \{ |\Delta I_{\phi 1}|, |\Delta I_{\phi 2}|, \dots, |\Delta I_{\phi n}| \}$$

$$\Delta I_{dT} = |I_d(t-T) - I_d(t-2T)|$$

式中： ΔI_1 、 ΔI_2 、 \dots 、 ΔI_n 为流入变压器各侧的故障分量电流； $\Delta I_{\phi 1}$ 、 $\Delta I_{\phi 2}$ 、 \dots 、 $\Delta I_{\phi n}$ 类同；式中的 max 是取最大的相电流， ΔI_{dT} 为浮动门槛。

从式（2）中可以看出，判据已经消去了变压器内部故障时负荷电流的制动作用，浮动门槛 $1.25 \Delta I_{dT}$ 一定程度上改善了变压器内部故障时的灵敏性，但是比例制动系数一般采用固定值，如式（2）中的 0.6 和 0.75，不管变压器是区内还是区外故障，制动曲线斜率一定，这在很大程度上影响了变压器差动保护的灵活性，同时由于本保护采用的是故障分量，该保护只能短期投入，还必须妥善处理保护的返回问题。

为从根本上解决差动保护的灵活性，使得差动保护在变压器区内故障时具有较小的制动量，保护能灵敏可靠动作，区外故障时能自动加大制动力度，保护可靠不动作，本文提出了一种自适应差动保护原理。

2 自适应差动保护原理及动作特性

2.1 自适应电流差动保护判据的提出

评价电流差动保护的性能指标，是区内故障快速、灵敏、可靠动作跳闸，而外部故障则必须安全不误动作。传统的电流差动保护，通常采用差流越限作为内部短路动作判据，而外部故障则依赖于各种不同原理的制动量方式提高保护的安全性。

本文明确提出：通过分析变压器发生区内区外故障的电气特性，提出一控制因子 $Q(B)$ ，实时的调整变压器差动保护的制动系数，使得变压器差动保护具有自适应性。

自适应电流差动保护判据:

$$|\dot{I}_d| \geq [K_1 + K_2 \cdot Q(B)] \cdot |\dot{I}_{res}| + I_{set} \quad (3)$$

式中: I_d 为动作电流; I_{res} 为制动电流; $Q(B)$ 为与变压器各侧电流有关的一个控制因子 (符号函数), 其中 $B = f(\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_n)$; K_1 为差动保护整定的制动系数、 K_2 为某一比例常数; I_{set} 为电流整定值。

2.2 自适应电流差动保护判据的实现

本文以三绕组变压器为例来说明自适应电流差动保护的算法实现, 三绕组变压器接线方式如图 2 所示。

本文提出的自适应电流差动保护判据式 (3) 由动作量 \dot{I}_d 和制动量 \dot{I}_{res} 组成, 右侧第一项由控制因子 $Q(B)$ 控制, B 是与变压器各侧电流有关的某种函数, 本节将详细介绍如何利用故障电流来自适应调整制动量。

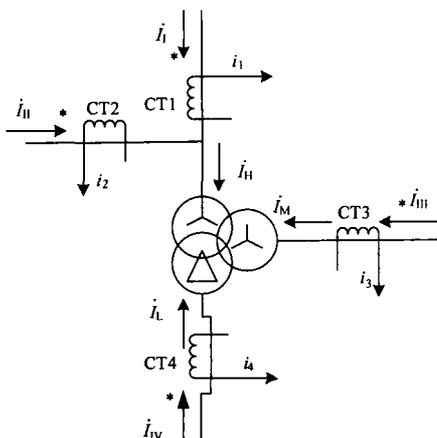


图 2 差动保护电流的正方向

Fig.2 Positive direction of the percent-ratio differential operation's current

图 2 示出了流入变压器故障电流的正方向, 其动作电流可以表示为:

$$i_d = |\Delta i_1 + \Delta i_2 + \Delta i_3 + \Delta i_4|$$

当变压器发生区外故障时, 若其高压侧发生区外故障, 则有:

$$|(\Delta i_M + \Delta i_L) - \Delta i_H| > K |\Delta i_M + \Delta i_L + \Delta i_H|$$

即: $|(\Delta i_M + \Delta i_L) - \Delta i_H| > K i_d$

同理, 中压侧发生区外故障时有:

$$|(\Delta i_H + \Delta i_L) - \Delta i_M| > K i_d$$

低压侧发生区外故障时有:

$$|(\Delta i_H + \Delta i_M) - \Delta i_L| > K i_d$$

上式中, $K \approx 2.0$ 为大于 1 的常数, 考虑一定裕量通常情况下取经验值 $K = 1.5$ 。

于是令:

$$\begin{cases} B_1 = |(\Delta i_M + \Delta i_L) - \Delta i_H| \\ B_1 = |(\Delta i_H + \Delta i_L) - \Delta i_M| \\ B_1 = |(\Delta i_H + \Delta i_M) - \Delta i_L| \end{cases} \quad (4)$$

同理, 也可以采用各侧电流突变量相位比较来鉴别变压器区内、区外故障。区内故障各侧电流的故障量都是流入变压器的, 其流向如图 2 的正方向所示。

理论上变压器各侧故障电流是同相位的。在实际电力系统中, 考虑一定的相位裕度, 可取 $\varphi = 45^\circ$ 。

$$\begin{cases} \arg \frac{\Delta I_H}{\Delta I_M} < \varphi \\ \arg \frac{\Delta I_M}{\Delta I_L} < \varphi \\ \arg \frac{\Delta I_H}{\Delta I_L} < \varphi \end{cases} \quad (5)$$

应该指出, 变压器内部故障, 无源侧可能无故障电流供给, 可默认满足同相条件。

于是令

$$\begin{cases} B_2 = \arg \frac{\Delta I_H}{\Delta I_M} \\ B_2 = \arg \frac{\Delta I_M}{\Delta I_L} \\ B_2 = \arg \frac{\Delta I_H}{\Delta I_L} \end{cases} \quad (6)$$

对控制因子 $Q(B)$ 的基本要求是在变压器外部故障时能增大制动量, 而在内部故障时又能减小制动量, 使变压器差动保护可靠动作跳闸。于是有控制因子的动作特性如式 (7)、(8) 所示。

当 $B_1 < 1.5 i_d$ 或 $B_2 > \varphi$ 时, 令

$$Q(B) > 0 \quad (7)$$

当 $B_1 \geq 1.5 i_d$ 或 $B_2 < \varphi$ 时, 令

$$Q(B) < 0 \quad (8)$$

由此可见, 通过实时检测变压器各侧故障电流的幅值或相位可自适应判别出 $Q(B)$, 当变压器发生区外故障时, 可自适应判别出 $Q(B)$ 为负号, $K_1 + K_2 \cdot Q(B)$ 增大, 起增大制动量作用; 发生内部故障时, 自适应判别出 $Q(B)$ 为正号, $K_1 + K_2 \cdot Q(B)$ 减小, 起减小制动量作用, 调整力度

的大小由系数 K_2 决定。

辅助判据的动作逻辑图如图 3、4 所示。

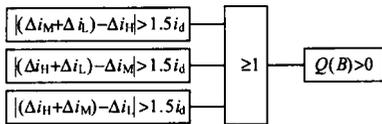


图 3 变压器区外故障判定逻辑图

Fig.3 Logical diagram for discriminating the external faults of transformer

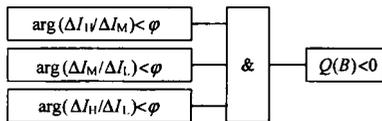


图 4 变压器区内故障判定逻辑图

Fig.4 Logical diagram for discriminating the internal faults of transformer

因为在差动保护的判据式 (3) 中引入了控制因子 $Q(B)$ ，对于空投变压器时很容易满足式 (8)，若空投于故障变压器时该保护能够迅速动作出口；若空投正常变压器，保护通过谐波闭锁可安全不动作。对于由区外故障时产生的较大不平衡电流，新动作判据具有自动识别内部故障和外部故障的性能，从而使差动保护大大提高了区外故障的安全性和区内故障的灵敏性。因此，对诸如变压器励磁涌流等产生的不平衡电流在该控制方法中也具有较好的控制效果。

2.3 自适应电流差动保护特性分析

自适应电流差动保护的可靠性分析如图 5 所示 (图中阴影部分为动作区)。

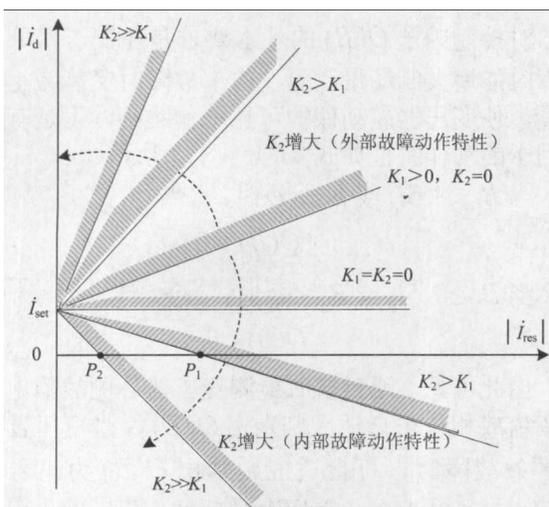


图 5 自适应电流差动保护的可靠性分析图

Fig.5 Reliability analysis of adaptive current differential protection

从图 5 可见，在内部故障时，若选取 $K_2 > K_1$ ，将会出现动作电流 $|i_d| \approx 0$ 的极限情况，如图中 P_1, P_2 点所示，由式 (3) 可得：

$$(K_1 - K_2) |i_{res}| + i_{set} = 0$$

即：
$$|i_{res}| = \frac{i_{set}}{K_2 - K_1} \quad (9)$$

由式 (9) 可见， K_2 越大， $|i_{res}|$ 越小，保护就会越灵敏。

3 自适应电流差动保护仿真

利用数据仿真来定性分析常规比率差动与本文提出的自适应比率差动的动作特性，通过比较来说明其性能优越性。

如图 6 所示 220 kV 变压器系统中，系统参数有变压器参数：容量 360 MVA，各侧电压高压侧 220 kV、中压侧 110 kV、低压侧 35 kV，变压器阻抗比 $x_{12} = 0.067$ 、 $x_{23} = 0.185$ 、 $x_{13} = 0.101$ ，系统等值短路容量 $S_1 = 5000$ MVA， $S_2 = 1000$ MVA，G1 发电机组：容量 400 MVA， $\cos \varphi = 0.85$ 、 $X'_{d\Sigma} = 1.867$ 、 $X'_{d\Sigma} = 0.257$ 、 $X'_{d\Sigma} = 0.199$ ，CT 变比为 CT1=240，CT2=400，CT3=1200。

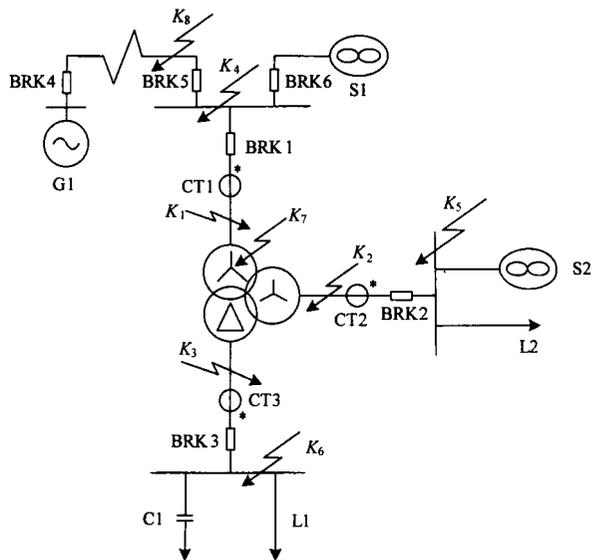


图 6 变压器仿真系统接线图

Fig.6 The diagram of transformer simulation system

在实时数字仿真装置 (RTDS) 上建立变压器保护试验动模模型进行仿真实验，模拟中压侧区内发生 A 相经 100Ω 过渡电阻单相接地故障，制动曲线系数 $K=0.5$ ， $i_{set} = 0.7$ A，应用常规方法和自适应方法仿真结果如图 7、8 所示，其中自适应差动控制因子取 $K_1=0.5$ ， $K_2=0.3$ 。

在模拟变压器中压侧区内 K2 点发生 A 相经过 100 Ω 过渡电阻单相接地故障时变压器三侧电流采样值如图 7 所示, 常规比率差动保护与本文提出的自适应差动保护动作特性曲线如图 8 所示。

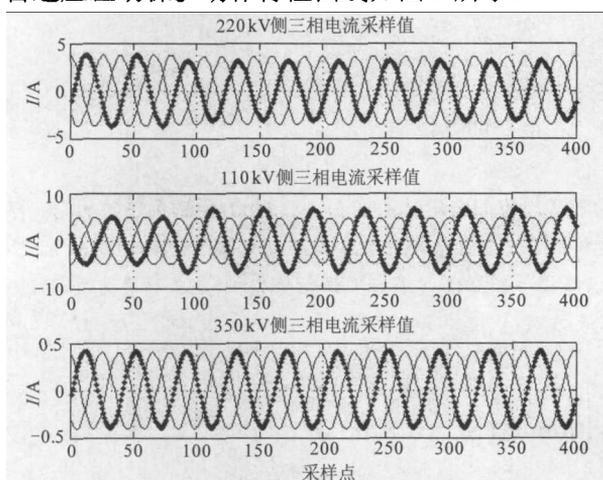


图 7 故障变压器三侧电流采样值

Fig.7 Sampling currents of the fault transformer

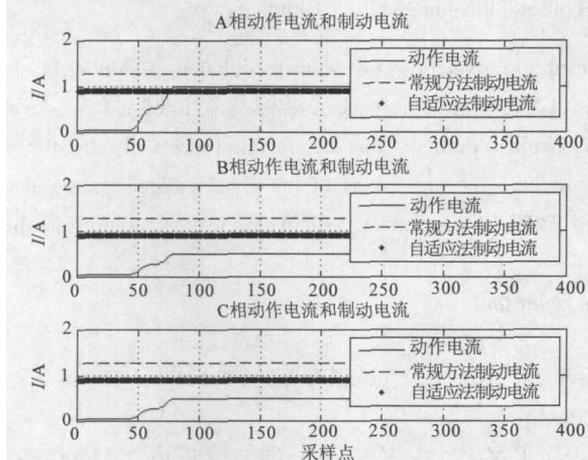


图 8 常规比率差动动作特性曲线与自适应电流差动保护动作特性曲线比较

Fig.8 The comparison of the traditional percent-ratio differential operation with the adaptive percent-ratio differential operation's characteristic curve

从仿真结果可以看出, 常规比率差动保护在经过高阻接地故障时灵敏度较低, 保护可能引起拒动, 但是本文提出的自适应比率差动保护在区内故障时具有较高的灵敏度, 区外故障具有较高的防卫度, 但是本方法对装置的硬件有较高的要求, 在故障初始 3~5 ms 采样值能可靠反映故障特征, 也就是说装置必须具备高速采样的能力。

4 结论

在变压器差动保护的判据中引入了与变

压器各侧电流有关的控制因子 $Q(B)$ 使新动作判据在外部故障时具有很强的制动作用, 可防止保护误动; 在内部故障的时候减小制动能力, 使得变压器差动保护具有很高的动作灵敏度。通过自适应电流差动保护的可靠性分析及仿真试验证实该判据具有很强的实用意义和经济价值, 本方法已在西瑞公司 XRT-220 自适应变压器保护装置中得到运用, 试运行结果证实该方法的可靠性和实用性。

参考文献

- [1] 唐涛, 诸伟楠, 杨仪松, 等. 发电厂与变电站自动化技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
TANG Tao, ZHU Wei-nan, YANG Yi-song, et al. Automation technology and application of power plant and transformation substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [2] 许正亚, 陈月亮. 外部短路故障切除时变压器差动保护行为分析[C]. //江苏电网主设备保护学术研讨会论文集. 2002.
XU Zheng-ya, CHEN Yue-liang. Analysis of transformer differential operation when removing the transformer's external faults[C]. //The literary selections of the Jiangsu power main equipment protection. 2002.
- [3] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 163-169.
XU Zheng-ya. Digital protection for power transformer and medial-low voltage electric power net[M]. Beijing: China Water Resource and Hydroelectrical Press, 2004: 163-169.
- [4] 袁荣湘, 陈德树, 马天皓, 等. 基于故障分量的采样值电流差动保护研究—原理分析[J]. 继电器, 2002, 28(3): 9-14.
YUAN Rong-xiang, CHEN De-shu, MA Tian-hao, et al. The research of the sampling value differential protection based on the fault component[J]. Relay, 2002, 28(3): 9-14.
- [5] 王文涛. 变压器差动保护区外短路误动分析及防止措施[J]. 四川水利发电, 2006, 25(1): 78-80.
WANG Wen-tao. Analysis and counter-measures of misoperation of the transformer differential misprotection in the external faults[J]. Sichuan Water Power, 2006, 25(1): 78-80.

收稿日期: 2009-10-19; 修回日期: 2009-12-03

作者简介:

余加霞 (1982-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事变压器继电保护方面研发工作; E-mail: yujiexia2008@126.com

张恒泰 (1980-), 男, 从事继电保护方面研发工作;

葛耀中 (1929-), 男, 教授, 从事继电保护工作。