

模糊标积制动原理的变压器微机差动保护

徐建政

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 介绍一种用双机 CPU 构成的基于模糊集理论的双绕组变压器微机差动保护装置。高性能单片机 87C552 和 DSP 器件 TMS320C30 通过双口 RAM 芯片 IDT7132 等构成一个高功效的微机控制系统。该差动保护动作判据集标积制动原理和突变量原理为一体, 由程序适时计算修正模糊控制系数, 可以保证在区内故障时, 尤其是在匝间短路时具有较高的灵敏度, 在区外故障时能可靠地不动作。

关键词: 模糊系数; 突变量; DSP 器件; 差动保护

中图分类号: TM772

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2001)09-0046-04

1 概述

随着我国电力系统的不断发展和自动化水平的提高, 对变压器安全、可靠运行提出了更高的要求, 近年来采用了许多微机型变压器差动保护装置。由于计算机技术发展, 硬件条件有了很大改善, 使一些新理论、新保护判据实现成为可能。特别是高性能十六位单片微机以及 DSP 器件的相继出现, 使研制的微机型变压器差动保护装置功能更加完善, 速动性、灵敏性和可靠性都有了很大的提高。原文献^[1]曾提出了一种集成电路标积制动的双绕组变压器差动、突变量标积制动差动保护判据, 并在许昌继电器厂通过动模实验。其主要动作判据如下^[1]:

$$K_1 \times |\dot{I}| + K_2 \times |\dot{I}_1| \times |\dot{I}_2| \cos \alpha > 0 \quad (1)$$

式中 $K_1 \times |\dot{I}|$ 为突变量项, $K_2 \times |\dot{I}_1| \times |\dot{I}_2| \cos \alpha > 0$ 为标积制动项

K_1 为灵敏度系数、 K_2 为标积系数;

α 为 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 的相位差;

$|\dot{I}|$ 为电流差的突变量。

这一判据在理论上把原有的电流差的突变量和标积项有机结合起来, 使判据能自动地适应运行情况的变化。但是由于标积制动项是利用 $\cos \alpha$ 来区分区内、区外故障的, 对于严重区内故障来说 $\cos \alpha > 0$, 可以正确地地区分, 而对于相当一部分匝间短路来说, 如果穿越性负荷电流仍很大, 以至于负荷电流与一次电流的相位差在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间, 从而使得 $\cos \alpha < 0$ 。故标积制动项有时也不能很好地来区分区内、区外故障。

本文针对这种突变量标积制动差动保护判据, 具有对区分区内、区外故障判断的不确定性, 应用模糊控制理论, 对于标积制动项引入模糊系数, 利用微

机控制技术适时地改善了判据的灵敏度, 并研究开发了基于模糊集理论的变压器微机差动保护硬件结构及软件程序, 该装置在动模试验和实际应用中都达到了良好效果。

2 模糊标积制动差动保护判据实现

引入模糊系数后新的变压器突变量标积制动差动保护判据为

$$K_1 \times |\dot{I}| + P \times K_2 \times |\dot{I}_1| \times |\dot{I}_2| \cos \alpha > 0 \quad (2)$$

其中 P 为模糊控制系数, α 仍为 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 的相位差。

2.1 模糊控制系数 P 的定义函数

本装置差动保护新判据的关键内容是如何根据系统电流 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 的相位差 α 的变化, 适时计算修正模糊控制系数 P 的值, 既保证在区内故障时, 尤其是在匝间短路时具有较高的灵敏度, 又能在区外故障时可靠地不动作。

由于 $|\dot{I}_1| \times |\dot{I}_2| \cos \alpha$ 的变化主要由电流相位差和电流幅值引起, 对于变压器两侧电流相位差来说确实反映了一定的故障情况, 为此对于模糊系数 P 设定了两个模糊集 M 、 N 。

$$\text{定义 } M = \{ f_1(\alpha), \quad [0^\circ, 360^\circ] \} \quad (3)$$

其中 $[0^\circ, 360^\circ]$ 是两侧电流相位差。

其反映角度的变化趋势, 当角度从 180° 向 90° 或 270° 变化时表明可能是故障, 反之可能不是故障。其隶属函数为:

$$f_1(\alpha) = \begin{cases} 1 & -90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 1 / \{ 1 + [a \times (1 + \cos \alpha)]^2 \} & 90^\circ < \alpha < 270^\circ \end{cases} \quad (4)$$

其中 $a > 0$ 是一个定参数。

$$\text{定义 } N = \{ f_2(\alpha), \quad [0^\circ, 360^\circ] \} \quad (5)$$

对于变压器两侧电流相位差来说确实反映了一定的故障情况,在正常情况下其理论相位差为 180° ; 如果考虑误差因素则在正常情况下为 $180^\circ \pm$, 如超出这个范围则可以认为是内部故障或异常,为此其隶属函数为:

$$f_2(\phi) = \begin{cases} 1 & -90^\circ \sim 90^\circ \\ \exp[-K(\phi - 180^\circ)^2] & 90^\circ \sim 270^\circ \end{cases} \quad (6)$$

其中 $[\phi, 360^\circ]$ 是两侧电流相位差, $k < 0$ 是一个定参数。该隶属函数的目的是为了在区内故障时缩小制动区。

对于上述两个模糊集合取它们的交,即 $A = M \cap N$ 。根据模糊集理论^[4]以及逻辑分析^[2]得到 P 的模糊集为 $M \cap N$, P 的定义函数为:

$$f_p(x) = \min[f_1(x), f_2(x)] \quad (7)$$

$f_1(x)$ 是偏小型模糊分布,其典型隶属函数式为 $\mu(x) = 1/(1 + ax^2)$, 其中定常数 $a > 0$ 值充分考虑到测量误差、较弱的内部故障和异常现象,放宽了动作区,影响着差动保护的灵敏性。而 $f_2(x)$ 是中间型模糊分布,其典型隶属函数式为 $\mu(x) = \exp(-kx^2)$, $k < 0$ 值缩小了制动区,决定差动保护的可靠性。由于 a, k 两者相互制约,与灵敏度系数 K_1 、标积系数 K_2 也有关联,变化范围较大,应在差动保护装置按装现场,与 K_1, K_2 配合调试确定。一般取 $a = 1 \sim 3.5$ 、 $k = - (0.01 \sim 0.002)$ 之间范围。由于在判据中引入模糊集理论,可以通过调节相应的系数或常数来改变判据的动作行为,具有很大的灵活性,从而对变压器的匝间短路具有很强的反应能力,同时对其穿越性区外故障也具有很强的制动能力。

2.2 具有模糊控制系数 P 的保护特性分析

为了分析模糊控制系数 P 对保护动作特性的影响,本文采用轨迹法。为了便于仿真分析,首先设立一个多元函数:

$$f(\phi, I) = K_1 \times |I| + P \times K_2 \times |I_1| \times |I_2| \cos \phi \quad (8)$$

其中定义 $I = I_1 - I_2$

为了说明引入模糊控制系数 P 后保护判据的动作情况,分以下两种情况对其进行仿真分析。

1) 在变压器两侧电流幅值、相位差不随时间变化,即 $|I| = 0$ 、 $\phi = 0$ 的情况下,改变 P , 使 ϕ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化。此时, $K_1 \times |I| = 0$ 仿真的是标积制动项的制动特性。其动作轨迹为图 1。改变 P 定义中的 k 参数,可以改变制动区的大小和曲线的变化率。由曲线可以看出,标积制动项

的标积制动特性不再按正弦规律变化,当变压器两侧电流的相位差在 180° 时标积制动量很大,而当相位差偏离 180° 时,制动特性按比正弦规律陡的曲线变化,从而提高了其对匝间短路的灵敏度。保证了对区外故障的制动能力。

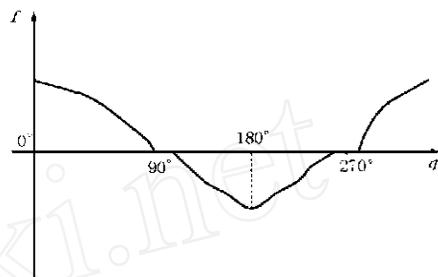


图 1 标积制动项的制动轨迹

2) 在变压器两侧电流幅值不变,即 $|I| = 0$ 的情况下。令 $\phi = 140^\circ, 180^\circ, 200^\circ$, 使 I 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化。即 ϕ 由 $140^\circ, 180^\circ, 200^\circ$ 向 $0^\circ \sim 360^\circ$ 突变。此时模拟的是相位差的突变。见图 2。可见当角度变化趋于是 180° 时,制动作用加强,此时相当于变压器由故障状态向正常状态转变,保护不应动。并且可以看出,其制动量增加的速度快于按正弦规律的变化速度。当角度变化偏离 180° 时,制动作用减弱,此时相当于变压器发生故障。保护应趋于动作。

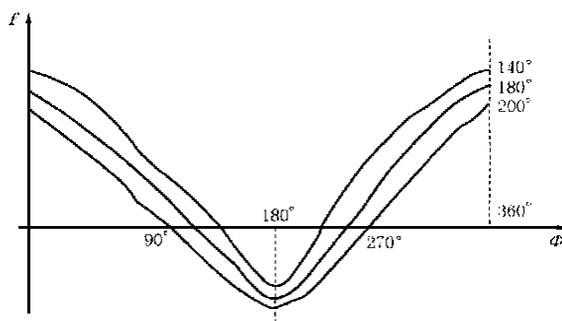


图 2 相位差突变对判据的影响

通过以上分析可知,在判据中引入模糊集理论,可以通过调节相应的系数或常数来改变判据的动作行为,具有很大的灵活性,从而对变压器的匝间短路具有很强的反应能力,同时对其穿越性区外故障也具有很强的制动能力。

3 本装置软硬件技术特点

本装置的硬件结构原理框图如图 3 所示。整个系统采用双 CPU 微机构成。电流采集按相序划分为结构相对独立的三个信号调理、A/D 变换单元,一

片 87C552CPU 作为前置机,负责采样保持、A/D 变换和数据前期处理;TMS320C30 作为主 CPU 进行 FFT 变换、数字滤波,根据差动保护动作判据条件迅速、准确地发出控制命令。通过双口 RAM 的数据通信,保证两个 CPU 工作步频协调一致。整个装置主要技术特点如下:

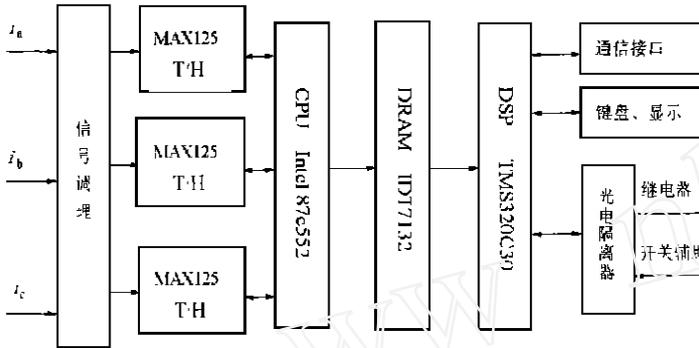


图3 计算机系统硬件框图

3.1 带有低通滤波的信号调理单元

本单元由 LC 构成一级低通滤波器,可有效地滤除共模信号干扰,试验表明特别对 EMI 和火花冲击干扰具有良好的抑制效果。经过一级运放放大后,调理生成 A/D 变换所需的输入电压信号。

3.2 高性能的 A/D 转换器 MAX125

美国 MAXIM 公司生产的高速八路 14 位 A/D 转换器 MAX125,具有四路同时跟踪/保持电路,每路转换时间为 3μs;四路通道吞吐速率为 76kpsps。因此 MAX125 特别适合于电力系统多路交流信号的采样转换。

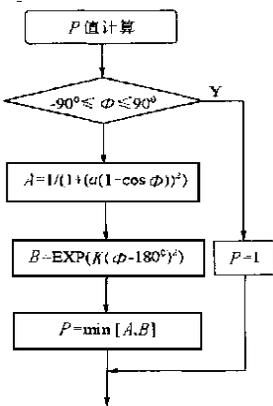


图4 计算模糊系数 P 值的程序流程图

3.3 TMS320C30 主 CPU

TMS320C30 是美国 TI 公司推出的一种低价位、高性能 16 位定点运算的 DSP 器件。C30 结构是基于改进的哈佛结构,支持分离的程序空间和数据空

间总线。具有强大的数据运算处理能力,特别对于 FFT、DFT 及矢量矩阵运算等,其程序代码效率和运算速度特别高。该器件将高性能的 DSP 内核和丰富的微控制器外设功能集于一身,其 SCI 和 SPI 通信接口、片内 8K ×16 位 FLASHRAM、内嵌 CAN 控制器和 A/D 转换器等无不控制系统应用提供了一个理想的解决方案。

3.4 模糊系数 P 的生成

为了实现模糊控制系数 P 的实时修正,在具体编程中首先判别电流相位差的范围,而后根据 (4) ~ (7) 式计算确定 P 值,其判别程序框图如图 4 所示。

3.5 差突变量、标积量、二次谐波制动量的获取

获取差突变量时,充分地利用计算机的记忆功能和运算能力,保证工频每周波内都刷新差突变量的最大值,以确保差动保护的灵敏度。

由于标积制动原理不能区分励磁涌流和区内故障两种情况,当空载投入变压器而产生励磁涌流时,利用其含有很大的二次谐波制动分量,闭锁动作回路以保证保护此时不动作。

为了获得差突变量、标积量和二次谐波分量,其电流基波及二次谐波分量均采用全周富氏滤波算法。设

$$i(t) = \sum_{k=1}^{11} I(k) \sin(k t) \tag{10}$$

每个工频周期采样 12 点,则全周富氏滤波离散化算法为

基波幅值电流

$$I_1 = \frac{1}{6} \sqrt{\sum_{k=0}^{11} \left| i_k \sin\left(k \cdot \frac{\pi}{6}\right) \right|^2 + \sum_{k=0}^{11} \left| i_k \cos\left(k \cdot \frac{\pi}{6}\right) \right|^2} \tag{11}$$

差电流

$$I_2 = \frac{1}{6} \sqrt{\sum_{k=0}^{11} \left| (i_{1k} - i_{2k}) \sin\left(k \cdot \frac{\pi}{6}\right) \right|^2 + \sum_{k=0}^{11} \left| (i_{1k} - i_{2k}) \cos\left(k \cdot \frac{\pi}{6}\right) \right|^2} \tag{12}$$

二次谐波幅值电流

$$I_3 = \frac{1}{6} \sqrt{\sum_{k=0}^{11} \left| i_k \sin\left(k \cdot \frac{\pi}{3}\right) \right|^2 + \sum_{k=0}^{11} \left| i_k \cos\left(k \cdot \frac{\pi}{3}\right) \right|^2} \tag{13}$$

为了提高测量精度和考虑衰减的直流分量的影响,采样点也可以考虑采用差分法处理后再进行富

氏滤波。此方案虽然可以提高精度,但是对保护动作速度有影响,可以根据实际情况来选择滤波方案。

4 试验结果与应用

针对本装置试验,首先采用调压器、移相器、变阻器及各种测量表计建立了一个静态实验系统,通过调试模拟正常工作状态,由毫秒计测量差动保护的動作时间。然后在动模室进行动态模拟试验,两种实验结果的几个典型数据及结论见表1。

表1 两种试验结果典型数据

试验工况 动作时间	动作状况 动作时间	静态模拟	动态模拟
正常运行/区外故障	不动作	————	————
多次空载投入	不动作	————	————
严重区内故障	差动动作	16.5ms	15.1ms
区域内匝间短路	差动动作	18.2~20.4ms	17~19.6ms

本装置在实现基于模糊集理论的变压器差动保护中,由于采用了高性能双CPU构成的微机保护系统,因而具有动作速度快、灵敏度高、抗干扰能力强

等特点。通过应用模糊集理论和原有标积项有机结合,改善了判据的動作性能和制动性能。在基于模糊集理论的变压器差动保护判据中,由程序计算修正模糊控制系数 P 的值,保证了在区内故障和匝间短路时具有较高的灵敏度,在区外故障时可靠地不动作。本装置在变电站综合自动化配套应用中也取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 李家庭,徐建政.标积式突变量继电器的研究.电力系统自动化第十届年会论文集,1994.
- [2] 王广延.电力系统元件保护基础.水利电力出版社,1986.
- [3] 王维俭.大机组继电保护基础.水利电力出版社,1989.
- [4] 赵振宇.模糊理论和神经网络的基础与应用.清华大学出版社,1997.

收稿日期: 2001-02-18; 改回日期: 2001-06-14

作者简介: 徐建政(1956-),男,工学硕士,副教授,研究方向为电力系统运行监控、继电保护。

A micro-computer system on a transformer differential protection based on fuzzy set and scalar product breaking theory

XU Jian - zheng

(Electrical Engineering College, Shangdong University, Jinan 250061, China)

Abstract: This paper expounded a double CPU control device used for a transformer differential protection on fuzzy set theory. It is a high-powered micro-computer control system which consists of a single chip micro-computer 87C552, a DSP device TMS320C30, a double ports RAM IDT7132 and otherwise. The theory of fault criterion on a transformer differential protection is formed by incorporating the main point of both scalar product breaking theory and fault current mutation component theory. Fuzzy control parameters, which are calculated and modified timely by programming control, can ensure a criterion which should be both sensitive when internal faults occur or inter-turn faults occur and reliable when out-zone faults occur.

Keywords: fuzzy parameter; fault component; DSP device; differential protection