

微机在变压器保护中的应用

湖北省电力试验研究所 徐克尘 柳十一

摘要:

本文叙述了微型计算机在电力系统继电保护领域中作为变压器差动保护的一个实际应用情况。主要讨论了变压器保护算法的选择与模型的确定以及用汇编语言实现其算法的编程技巧,同时提出了微机保护在其硬件配置设计中需注意的几个问题,最后给出了一套实际装置“TDCR—1型变压器差动微机保护”的工作原理和在动模的试验结果。

概 述

近来随着新的技术革命的兴起,电力系统继电保护领域发展的一个趋势,就是各国都在研制以微计算机为核心部件的计算机保护。这一工作随着各种保护算法的研究深入以及计算机硬件价格的大幅度降低,在国内已有不少大学、研究所及制造厂家开始起步,取得了不少的进展。从各单位的资料来看,各类保护算法的研究和一些实施方案,大多数都集中在线路保护方面,就变压器的计算机保护实际运用,国内只有几家。我们已完成的在湖北隔卜变电站的一套变压器差动微机保护装置的研制就为了在保护的算法、尤其是在具体实现这一方面而进行了探讨。下面就这一微机保护装置采用微机如何实现、保护算法的研究以及如何实现算法的硬、软件的技术分别作一初步的介绍,与同行们共同讨论。

保护算法的选择及数学模型

1. 计算方法选择的原则

用微机实现变压器差动保护功能,采用何种计算方法是很重要的。我们的原则是能用较快的速度算出结果,并能在精度上满足工程上的要求。

现在一般的算法有数字式滤波(FIR或IIR滤波),富氏级数和最小二乘法曲线拟合等等。考虑到用数字滤波和富氏法用的乘法运算较多,对于Z80单板机做乘法运算的时间是相当可观的,所以我们采用正交方法来求富氏级数的各项系数。采用该法将通用的富氏级数所用的乘法运算转换成加法运算,从而大大提高了程序的计算速度。

2. 变压器差动保护在微机上实现所用的动作方程及判据

这里不准备深入探讨变压器差动保护的原理,这种保护为了躲过空投变压器的励磁

涌流有多种办法，我们选择了二次谐波作为保护制动量的动作判据。一般差动保护的动作为方程为：

$$\begin{cases} ID = ID_0 & (IZ \leq IZ_0) \\ ID - ID_0 = K (IZ - IZ_0) & (IZ > IZ_0) \end{cases}$$

式中， ID ——动作电流（差流）

ID_0 ——动作电流整定值

IZ ——制动电流

IZ_0 ——制动电流给定值

K ——差动保护的制动系数

以上公式的各值都是通过微机计算后的基波值。

当变压器空投时会产生很大的励磁涌流，若不采取相应措施可引起变压器误动作。涌流中含有较大的二次谐波，一般认为涌流的二次谐波不小于基波的百分之二十。所以在用正交方波计算富氏级数基波时也同时算出该级数的二次谐波的系数，并求出二次谐波幅值 I_2 。为了达到用二次谐波制动的目的，将 I_2 乘以六倍。上面公式将变为：

$$\begin{cases} ID = ID_0 + 6 I_2 & (IZ \leq IZ_0) \\ ID - ID_0 = K (IZ - IZ_0) + 6 I_2 & (IZ > IZ_0) \end{cases}$$

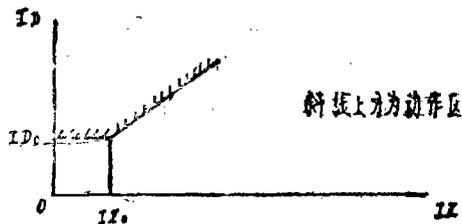


图 1：差动保护动作特性曲线

如图 1 所示差动保护动作特性：

3. 正交方波求富氏级数的数字计算方法

一般设任意一周期函数 $i(t)$ 都可用富氏级数来表示。

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin n\omega t + B_n \cos n\omega t)$$

$$(n = 1, 2, 3) \quad (1)$$

问题的关键是要求出 A_n 与 B_n 的值。而又因为正弦函数的正交特性，我们可以构造出不同的正交函数通过运算即可方便地求出 A_n 和 B_n 来。

对于电力系统的特点，我们只取富氏级数的前 5 项。（5 次谐波以上的都用模拟滤波器过滤掉）构造一个正交函数 $f(t)$ ，以便求出基波分量。

$$f(t) = \begin{cases} 1 & (0, \frac{T}{2}) \\ -1 & (\frac{T}{2}, T) \end{cases} \quad T \text{ 是一个周期的时间} \quad (2)$$

用 (1) 式乘以 (2) 式并积分有：

$$\int_0^T i(t) f(t) dt = \int_0^T I_0 f(t) dt + \int_0^T A_n \sin n\omega t dt + \int_0^T B_n \cos n\omega t dt$$

$$(n = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (3)$$

通过计算 (3) 式的右边第一项与第三项的积分为零，则右边第二项有：

$$\int_0^T A_n \sin n\omega t dt = \frac{4}{\omega} (A_1 + \frac{A_3}{3} + \frac{A_5}{5}) \quad (4)$$

再构造一个函数F(t)、令

$$F(t) = \begin{cases} 1 & (0, \frac{T}{4}) \\ -1 & (\frac{T}{4}, \frac{3T}{4}) \\ 1 & (\frac{3T}{4}, T) \end{cases}$$

用上同样方法有:

$$\int_0^T i(t) F(t) dt = \int_0^T I_0 F(t) dt + \int_0^T A_n \sin n\omega t dt + \int_0^T B_n \cos n\omega t dt \quad (n=1, 2, \dots, 5) \quad (5)$$

(5)式右边第一项、第二项为零。右边第三项有:

$$\int_0^T B_n \cos n\omega t dt = \frac{4}{\omega} (B_1 - \frac{B_3}{3} + \frac{B_5}{5}) \quad (6)$$

在实际工程中5次谐波分量较小略去不计有:

$$\int_0^T i(t) f(t) dt \doteq \frac{4}{\omega} (A_1 + \frac{A_3}{3}) \quad (7)$$

$$\int_0^T i(t) F(t) dt \doteq \frac{4}{\omega} (B_1 - \frac{B_3}{3}) \quad (8)$$

(7)、(8)式中含有3次谐波分量,用构造不同的正交方波也可求出3次谐波分量有(推导从略):

$$\int_0^T i(t) s(t) dt = \frac{4}{\omega} A_3 \quad (9)$$

$$\int_0^T i(t) s'(t) dt = \frac{4}{\omega} B_3 \quad (10)$$

其中s(t)、s'(t)是构造正交方波函数

同样可求得2次谐波分量有:

$$\int_0^T i(t) r(t) dt = \frac{4}{\omega} A_2 \quad (11)$$

$$\int_0^T i(t) R(t) dt = \frac{4}{\omega} B_2 \quad (12)$$

其中r(t)、R(t)为构造正交方波函数

i(t)为从电流互感器取样得来,每次采13点的电流值。这13个点的电流值用数值积分法可以求出(7)式至(12)式左端项的函数积分值,从而可以求出A₁、B₁、A₂、B₂的谐波分量值。其中A₁、B₁的值是(7)式减(9)式除以3,(8)式加(10)式除以3得到。进一步可以求出电流的基波幅值和二次谐波的幅值。

$$I_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2}$$

$$I_2 = \sqrt{A_2^2 + B_2^2}$$

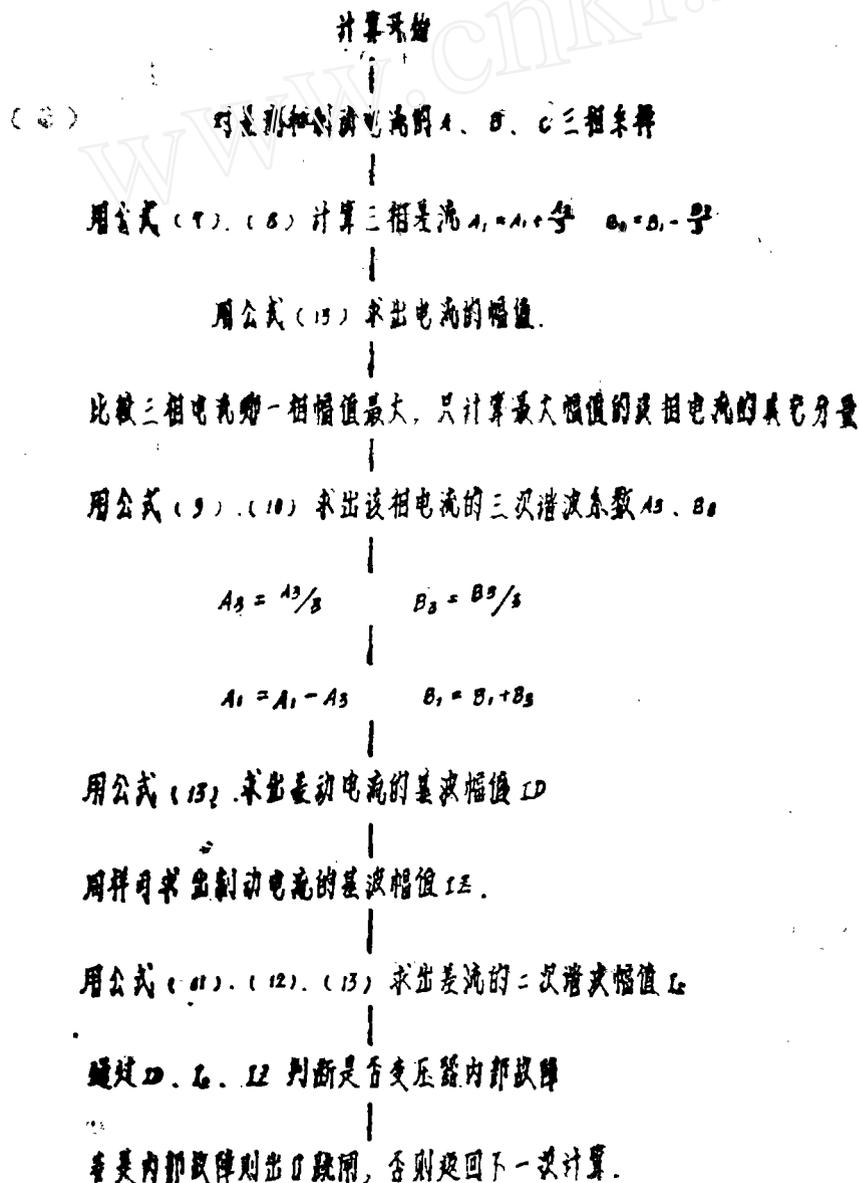
式中: I_1 ——基波的幅值

I_2 ——二次谐波的幅值

该二式在单板机上的计算速度太费时, 所以采用查表法来求 I_1 、 I_2 。具体做法是:

$$\left. \begin{array}{l} \text{因为 } \operatorname{tg} \theta = B/A \\ \text{通过 } \operatorname{tg} \theta \text{ 查表得 } \sin \theta \\ \text{所以 } I = B \times \sin \theta \end{array} \right\} \quad (13)$$

4. 计算流程图



算法的程序设计

我们知道，微机保护工作的实质就是运行其根据保护算法编制出来的计算程序。不论哪种算法，要在微机上运行，要靠编成程序来实现。而这一个编程的工作，又成为微机保护装置研制的主要工作。我们下面仅就这一计算程序的设计构思简述。

将微机应用于继电保护领域，所受的制约因素主要是二点，一是动作的正确性，二是动作的快速性。除了在硬件电路上保证可靠性以外，一旦保护算法确定之后，计算程序处理实时数据的时间、精度，就得靠编程人员的编程方法和编程技巧。首先我们决定了用Z80汇编语言来编制计算程序及其它的一些工作程序，这可是由硬件决定的。我们采用的微机是DBJ—Z80单板机，其次考虑到为使编制的计算程序通过部份能为别的保护算法编程时共用，确定了整个计算程序的结构为调用子程序处理的功能模块结构。即按照求解正弦交流量的基波、二次、三次等不同次谐波分量的任务分成各自的功能模块，这样可灵活地根据不同算法的要求而组成一个完整的计算程序。而在执行每一单独功能模块中所涉及的函数计算时采用调用对应该函数的计算子程序的方式。这种程序结构的通用性是强于其它结构的。

在本算法的计算程序中，根据整体设计要求，须完成对双字节长的、有正负符号的数据的加、减、乘、除、开方等函数计算多次，若是采用现有的通用计算程序，一是不适用，二是速度太慢。为此，在程序编制过程中，反复调试而编制出一些高速四则运算子程序及寻找到一种高精度的函数查表处理方法，占用的内存空间也不大。根据测试来看，时间很短，计算的精度也很高。

1. 数据规格化

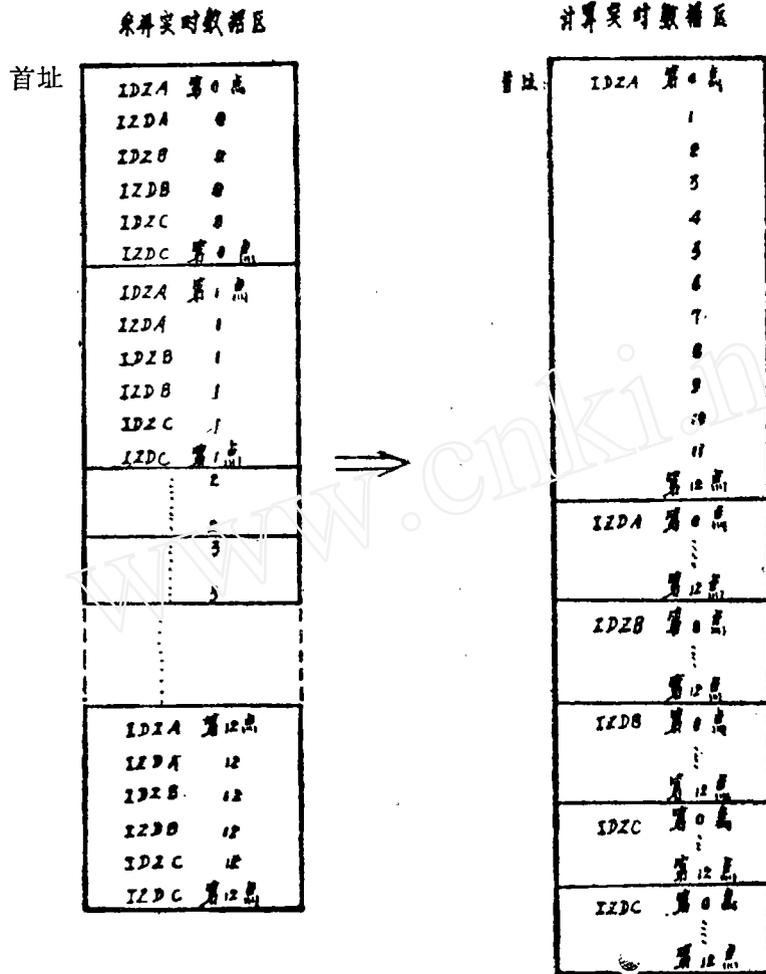
微机保护涉及到要将多个模拟电量（交流工频）通过A/D（模/数）转换成数字量的数据输入到主机中进行处理。目前的A/D板（12位以上）若将有正负极性的模拟量信号转换成数字量的码制都是双极性的二进制偏移码，与标准通常使用的二进制原码形式不同，而且其格式也有差异，在运算过程中很容易溢出。另外，因为对输入信号的几个量是按顺序逐个采样，其数据存放格式也不便于计算程序快速处理。为此，程序编制的第一步首先必须将对A/D转换后的数据存放顺序及数据的码制格式进行规格化处理。

（1）首先将六种模拟信号经A/D转换的各种各点的分散数据进行分类处理，按序存放。这是为了方便计算时快速调用数据，数据区存放格式的变换如下所示：

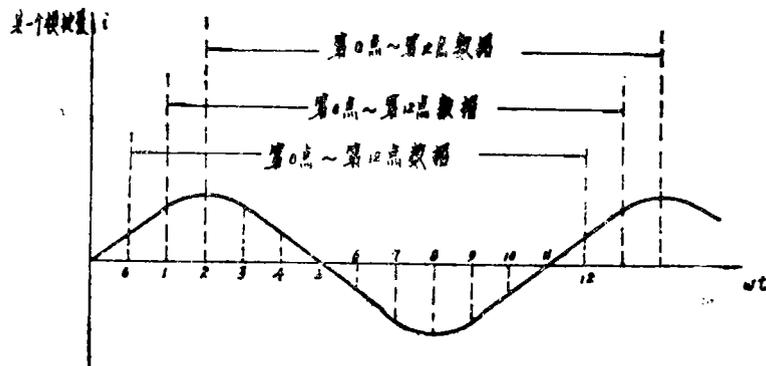
在这同时，采样控制程序还要完成这样一个任务，即每采集到一点新数据后，要将原十三点旧数据按照先进先出的按序位移方法，丢掉最先的第0点，顺序将后面的各点移上，最新的一点便作为最后的第12点。示意如下：

（2）数据格式变换。将A/D板输出的双极性偏移二进制码变换成主机计算所用的“缩小16倍的双极性计算偏移二进制码”。其对应变换关系见表1。

表1中的所谓“缩小16倍的计算偏移二进制码”实际上是将A/D板的12位转换值



对应的满量程的比率缩小了16倍，但实际采样值精度保持不变，仅仅是计算值数据的溢出范围增大了16倍。



D ₁₁	D ₁₀	D ₉	D ₈	D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀	对应模量
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	+V _{FSR} ($\frac{2047}{2048}$)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	+V _{FSR} ($\frac{1}{2048}$)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0V
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-V _{FSR} ($\frac{1}{2048}$)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-V _{FSR} ($\frac{2048}{2048}$)



D ₁₅	D ₁₄	D ₁₃	D ₁₂	D ₁₁	D ₁₀	D ₉	D ₈	D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀	对应模量
1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	+V _{FSR} ($\frac{2047}{32768}$)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	+V _{FSR} ($\frac{1}{32768}$)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0V
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-V _{FSR} ($\frac{1}{32768}$)
0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-V _{FSR} ($\frac{2048}{32768}$)

注：FSR—满量程

2. 符号处理子程序

由于算法要求要对采样数据进行代数和的运算处理,在作加、减运算过程中有一个对于正负符号处理的问题。我们针对着A/D转换的双极性偏移二进制码设计了一个“加法运算符号处理子程序”和一个“减法运算符号处理子程序”。其主要设计思想是根据Z80指令系统中16位算术运算指令执行时影响标志位的情况,总结出二个数相加(减)时标志位的变化规则,最终给结果数赋予一个正确的符号。这样,结合前述的数据规格化的处理,现在我们就可以非常方便、准确地进行带符号的双字节长的算术运算了。

3. 乘、除法运算

在Z80汇编语言中,没有现成的16位乘除指令,为此专门编制了几个子程序,有:

24位/16位=16位的除法子程序;

16位/8位=16位的除法子程序;

16位的乘法子程序。

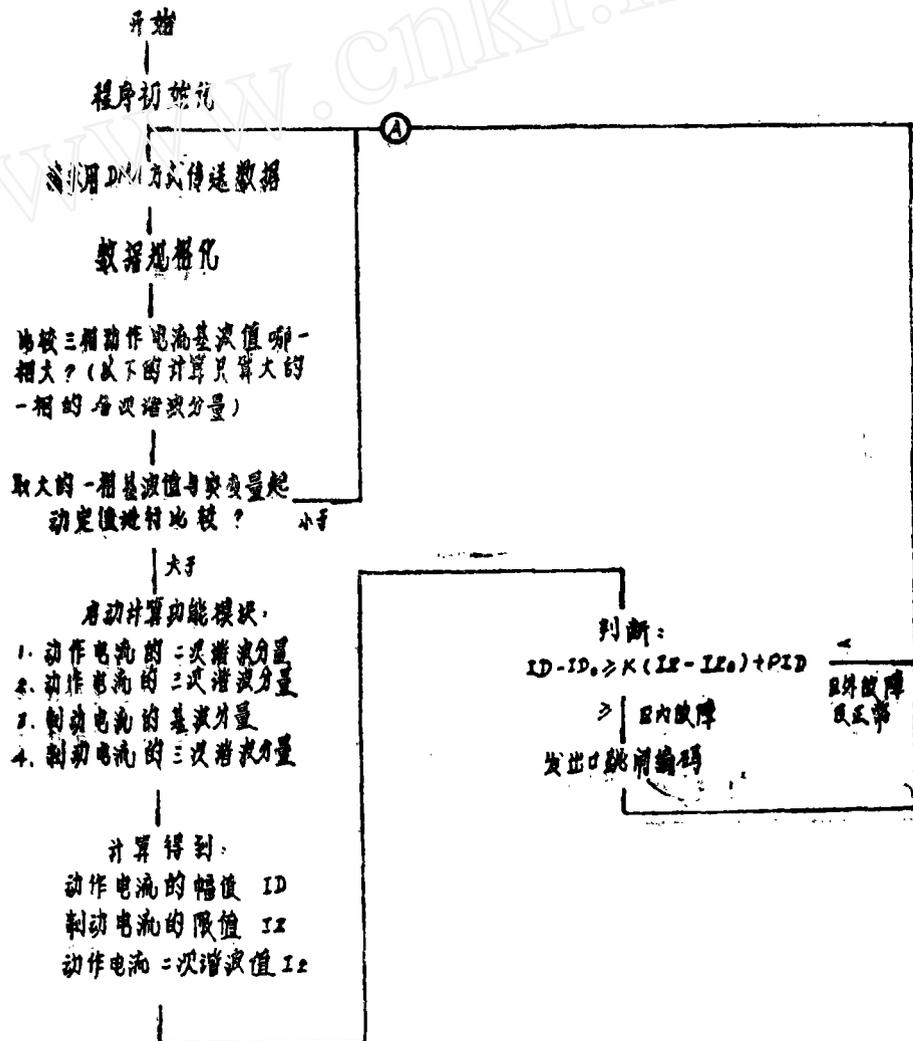
为此,我们可以做保护算法所需要的加、减、乘、除、函数的运算。

4. 开方运算的实现

在算法中,当计算得出某一谐波分量的实部和虚部值后,必须有一个开方运算 $\sqrt{A^2 + B^2} = I$ 求幅值。经过多次衡量,我们选择采取查表的方法来完成这一任务。我们要建立这样一个表格,它存放着对应于 $|B_m| / |A_m|$ 比值的 $1/\sin\theta$ 的函数值,而只要得到二个绝对值的比值(这一点很容易得到),一查表,就可找到对应的幅值大小。设计方法是利用PC-1500袖珍计算机,用BASIC语言编制一个程序,按照一个比值结果(高位是整数,低位字节是小数)中小数部份最低有效位的权为最小比值,即 $2^{-8} = 0.0039$,一直到整数部份最高有效位的权为最大比值,即 $2^7 = 255.00$,计算出

对应的 $1/\sin\theta$ 的值，并且将这些值变成十六进制数，将其直接固化在单板机内存的一块区域。这里面有个问题，若是将这个16位数的比值逐一对应的函数都列出，则需内存为64K容量，这显然是办不到的。我们采取的办法就是根据转换出来的函数值（十六进制）既不让它重叠，又不让它中间空隔二位的原則，分值分段将其设立成五个表格。在比值超过了以后的 $1/\sin\theta$ 值变化很小，就采用逻辑判断程序来直接得出对应的函数值。通过这些处理，整个函数表仅占0.6K内存。

5. 计算程序流程图



说明： ID_0 —动作电流整定值
 I_{Z0} —制动电流给定值
 K —斜率定值
 PID —6倍的 I_2

装置的硬件配置值得注意的问题

考虑到Z80单板机是八位字长，时钟频率2兆赫，而16位算术指令的执行时间又相当长，并且作为实时装置要运行的计算程序又是相当费时的。这样，除了在软件的设计上有如前述的各种方法之外，在硬件的配置上也必须要统筹考虑。

1. A/D模数转换部件的选择

对于微机保护，涉及多个模拟交流量的A/D转换，而每个量的采样间隔要求很短，因此对模数转换器选择要求主要是二点，转换的精度和转换的速度。电力系统保护装置输入的模拟信号的动态范围很大，在短路情况下其输入信号比之正常情况下将在几十倍乃至上百倍的范围内变化，这就必须保证A/D输出到微机的数据在最大值时不溢出，又得保证在最小值时不超过测量误差。因此，一般要求A/D转换的位数在12位及以上。同时，转换的时间要求是越快越好，可保证多个模拟量在某一时刻采集到数据的同时性。另外在有多余输入通道情况下，可使微机完成一机两套及多套保护的功能。例如，据保护算法要求，信号采样间隔在工频下每周为 30° （电角度），一种保护要六个模拟信号进行计算。若每一通道A/D转换周期（从发指令启动采样到将转换值数字量送到内存中）为 $200\mu\text{s}$ ，则只能使一台微机完成一套保护的作用，也浪费了多余的模拟器输入通道。若转换周期提高到 $100\mu\text{s}$ ，则就可在 30° 时间内完成二套保护所需求的数据采集工作。在本装置内，我们选择了北京计算机配件五厂的MS—1209模入数出接口板。

2. 系统配置方案的优选

通常，微机作为实时控制设备或分析仪器使用，都是使其工作在这种方式，即先采集一遍外界状态或数据，再进行一遍状态分析或数据处理，周而复始。这在缓慢过程是可行的。然而在电力系统的保护应用中，就难免受各种因素制约而影响到保护的速度和正确性。

我们曾进行过三种方案的试验比较，最后选定了采样和计算同步工作的第三方案。这就是充分利用目前市场大规模集成电路元件价格的低廉，专门设计制作了一块带CPU的采样控制功能模板，它与主机一起在同一时钟下同步工作，专管每隔 30° 将六个模拟信号采集一遍，存放在模板的RAM中，而主机专管计算，算完一遍后再请求最新数据再算。这种作法实际上就是牺牲成本，提高速度。

因此，我们说系统的硬件配置并非是一成不变的，而是要从多种方案中优选出最佳，然后才最后确定下来。

3. 保证可靠性和速度的进一步措施

为了提高微机保护出口的时间和动作的准确性，除了以上所谈的软、硬件设计上的一些考虑外，同时还要在辅助电路上多想办法。因为在电力系统现场运行的设备，对具有电子电路的各种装置有着很强的电磁干扰，而微机反映此干扰又特别厉害。我们采取了以下多种简易可行的抗干扰措施：

- （1）直流工作电源加强阻容滤波；
- （2）程序出口跳闸信号采用双路乃至多路编码输出；
- （3）装置采取闭锁电路用来防止上电、掉电时误发跳闸信号；

(4) 程序中设置防止死循环的自恢复保护;

(5) 硬件中设置自启动、再启动的电路。

同时,我们还更换了部份主机的元件,将微机工作时钟频率提高一倍,达到了Z80A系列硬、软件工作的水平,提高了速度。

装置的工作原理

本变压器微机差动保护装置的工作过程是这样的:

装置一上电之际,由自启动电路使之计算和采样两个系统同时开始工作。计算程序进行初始化工作时间加上软件延迟相当于采样系统已将一个工频信号的十三点数据采集到,此时保护算法计算程序向采样系统请求以DMA(直接存储器存取)方式而得到一批所需数据而开始一遍计算。在这个计算过程中,采样系统仍以每隔 30° (电角度)的时间间隔进行周期性采样、转换差动保护计算所需的六个数据(模拟量),每采集到新的一点,通过采样控制程序,采用按序分类排队位移的方法,将原十三点实时数据区中的第一点丢掉,以第二点作为第一点,类推,这新的一点就作为第十三点数据存放。这样做就确保了数据的实时性,只要任何时候计算系统申请,就将此刻存放在实时数据区的全部通过DMA方式直接传送给计算系统的内存中。

计算程序通过对变压器的三相动作电流、三相制动电流的采样数据进行计算而得到了其动作电流的幅值 I_D 、制动电流的幅值 I_Z ,动作电流的二次谐波分量 I_2 ,最后根据保护算法的判据,逻辑判断出此时变压器的工作状况,若是区内故障,则程序发一个跳闸信号编码到出口驱动电路去作用跳有关开关。并保持该代码不变,程序再申请新的数据进行计算,若故障仍未消失,其判断仍同上,继续出口,再计算……,一直到变压器故障切除,这时输入的数据不再是故障分量了,计算程序判断正常,此时才停发跳闸代码。当无故障情况,程序计算一遍后同样还是申请新的数据周而复始地工作下去。

结论及打算

本装置的研制在实施了以上所介绍的种种方法,措施,经过十个月的工作,已制作出第一套。经过了动模试验考核后,已装在湖北云梦电力局的一个35kV变电站内试运行。从动模试验情况来看,已达到了现场运行的设计要求(详细指标见附录A)。当然,,我们这只是一次尝试,下一步我们准备在以下二方面努力:一是实现一套微机两套或多套保护;二是充分利用微机的记忆功能,将故障的状态各个分量打印出来。

总之,微机应用于电力系统保护领域的工作是大有可为的!

附录A: TDCR—1型变压器差动微机保护动模试验报告(略)

参考文献

1. 《计算机继电保护技术的现状与展望》 陈德树 张之哲 《继电器》1983, 4
2. 《计算机继电保护系统》 黄焕焜 李菊 水电出版社
3. Digital Protection of a Power Transformer
IEEE PES Winter Meeting 1976, PP, 1—7
4. The Design and Test of a Digital Relay for Transformer Protection
IEEE PES Summer Meeting 1978, PP 1—9
5. 《微机继电保护及其工程算法》 於学焜 《继电器》 1984, 1