

大型变压器微机保护装置研制

鲍凯鹏,张 哲,尹项根,吴大立

(华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 结合大型变压器微机保护的开发生实践,对保护系统的硬件设计、不同保护原理的综合应用以及保护软件的编程实现方法等方面进行了研究和探讨。所开发的保护装置集主、后备保护于一体,通过采用高性能的 TMS320C6713 DSP 作为保护 CPU 和配备带有嵌入式 Linux 操作系统的 ARM 处理器作为管理机,满足了复杂保护的应用要求。主保护通过综合采用多种保护原理,充分发挥不同保护原理的优势,进一步提高保护的综合性能。同时,借助功能强大的硬件平台,在软件设计中采用基于“继电器”功能模块的设计方法,实现了程序的模块化和透明化,提高了软件开发效率,且易于维护和扩展功能。目前,该装置已通过静模测试和动模实验。

关键词: 大型变压器; 微机保护; 硬件结构; 软件设计

中图分类号: TM 774

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)09-0095-05

0 引言

随着电力系统的不断发展,超高压、大容量变压器的应用日趋增多。大型变压器传输功率大,造价昂贵,其安全运行对电力系统的稳定运行有重大影响,因此,对变压器保护装置的综合性能提出了新的更高要求。一方面,大型变压器一般将主、后备保护合并集成^[1],并要求能够根据现场的实际运行要求进行保护功能和出口方式的灵活配置,需要良好的硬件资源予以支持;另一方面,经过多年的研究和实践,在保护原理方面取得了不少新的进展,但如何充分发挥不同保护原理的优势,进一步提高保护的综合性能,仍值得进一步的研究和探讨。此外,大型变压器微机保护内部程序结构复杂,涉及的功能模块多,给保护软件的维护管理和保护装置的動作行为分析带来了困难。因此,如何改进软件设计方法,实现软件透明化设计,也是在保护装置研制过程中需要解决的重要问题。

这里结合大型变压器微机保护的开发生实践,对保护系统的硬件设计、不同保护原理的综合应用及保护软件的编程实现方法等方面进行研究和探讨。

1 装置硬件设计

1.1 总体设计原则和特点

根据大型变压器运行特点及对保护装置的应用要求,在装置硬件设计中,主要遵循下面的设计原则。

a. 大型变压器微机保护一般采用双重化配置^[2],2套保护装置的動作接点相并联,以提高保护动作的可靠性,并保证在保护装置检修期间变压器不失去保护。因此,在双重化配置原则下,保护装置硬件设计的重点是如何提高每套保护装置运行的安全性。

b. 大型变压器微机保护采用主、后备保护合并集成的运行方式,保护模块多,原理复杂,保护单元不仅要完成大量的计算、判断,还要完成录波、故障报告及与管理板的通信等任务。此外,从软件设计的角度看,保护软件的模块化和透明化也需进一步加强。这些都对保护 CPU 的运算速度和存储容量提出了更高的要求。因此,所选用的保护 CPU 的性能和配套资源应能很好地满足上述应用的需要。

c. 为实现管理的人性化和适应变电站综合自动化的发展需要,管理单元宜支持实时多任务操作系统和图形用户界面(GUI),并具有强大的网络通信功能,以更好地满足实际运行现场管理和维护的需要。

d. 变压器种类多,接线方式不尽相同,为了满足不同运行现场的应用要求,保护装置在硬件设计上应体现通用性,以降低开发和维护成本。

依据上述设计原则,并结合近年来微机技术的新进展,进行了保护装置硬件系统的研制和开发。保护装置采用分层式结构,如图 1 所示。其中,管理机与保护单元分离^[3],两者之间仅通过 CAN 网通信互联^[4],管理机故障,不影响保护单元的工作,以提高装置运行的可靠性。管理板采用插件式结构,便于通信线外引。

保护装置采用 6U、19 英寸标准机箱,背插式结构,实现强弱电分离,总线不出插件,减少了受外部干扰的影响。同时,装置的面板、指示灯、按键等均

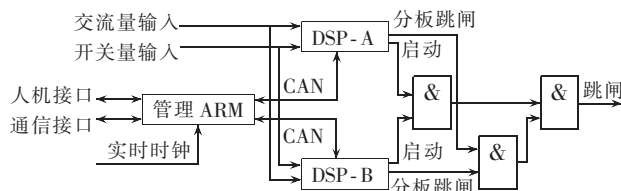


图 1 系统总体结构

Fig.1 Overall system structure

直接安装于母板,取消所有扁平电缆,以确保连接的高度可靠性,也有助于增强装置的抗干扰性能。

2 块核心处理插件 CPU-A 与 CPU-B 并行工作,共用模拟量和开关量输入通道以信号和跳闸出口。每块 CPU 插件都可独立完成全套的主、后备保护功能,有各自独立的启动元件,分别驱动各自独立的启动继电器。只有在 2 块 CPU 插件的启动元件均动作时才开放保护出口电源,以防止因 CPU 核心处理插件硬件故障而引起保护误动作。

1.2 保护单元设计

保护 CPU 选用 TI 公司的 TMS320C6713B DSP,其主频可达到 225 MHz,芯内含有 256 KByte 的高速内部 RAM,其相对于 TMS320VC33 而言,速度提高了几十倍,是一种高性能的浮点型 DSP,有效地提高了运算速度和数据处理能力。可较好地满足大型变压器微机保护对信号处理实时性的要求。

输入、输出通道配置兼顾了不同应用场合的实际需求,包括 48 路模拟量通道,32 路开入通道和 64 路开出通道。模数转换采用 ANALOG 公司的 250 kHz 16 位 8 路同时采保同时转换的 AD7656 模数转换器,6 片并行工作,大幅提高了 AD 转换的速度。增设了 2 M×32 位的 SDRAM 作为扩充内存,以满足大容量数据处理的要求。定值存储采用串行 EEPROM 存储器,以提高定值读写的可靠性。

启动报告、故障报告和事件记录的存储采用特殊设计的高速 SRAM 加电池的方法来实现。SRAM 的时钟频率为 183 MHz,可设计为 32 位操作,使得读写速度大幅提高,并可满足大容量数据可靠记录的应用要求。

装置需要监测的通道多,通信数据量大,为了提高通信传输速度,采用速率可达 1 Mbit/s 的 CAN 总线(SJA1000)与管理机进行通信。

1.3 管理单元设计

管理 CPU 选用美国 CIRRUS LOGIC 公司的 ARM9 处理器 EP9315,它的主频高达 200 MHz,支持嵌入式操作系统,并配备 MaverickCrunch 协处理器,用于浮点运算、DSP 运算和媒体处理。片内还带有 4 个异步/同步串口,2 个 10/100 BASE-T 以太网控制器以及 USB2.0 接口,为实现多端通信提供了良好的硬件基础。

管理板上带有 64 M SDRAM,32 M/64 M NOR Flash(INTEL),用于运行和存储操作系统及应用程序,以及 512 M NAND Flash(SAMSUNG),用于存放大容量记录数据。

管理板配备嵌入式 Linux 操作系统,它支持多线程技术,能够同时支持多端高速通信,包括:对保护 DSP 的通信线程(CAN 网),对自动化系统通信线程(以太网)和对本地上层调试系统的通信线程(以太网)。而且,嵌入式 Linux 操作系统在主机上的开发环境几乎和桌面 Linux 的开发环境一样,如果配置好交叉开发平台,熟悉 Linux 的用户可以轻松上手。在此基础上开发的管理软件可以方便地实现良好的人机交互,软件功能也便于扩展。

2 基本保护原理与特点

2.1 主保护

变压器主保护以差动保护为主,分别配置了差流速断保护、比率差动保护、零序比率差动保护和故障分量比率差动保护等,具体配置方案如图 2 所示。对于变压器差动保护而言,如何避免励磁涌流和外部故障 TA 饱和导致保护误动,是主保护原理设计中需要解决的 2 个关键技术问题^[5]。

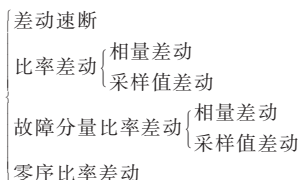


图 2 差动保护配置

Fig.2 Configuration of differential protection

相量比率差动保护运行经验丰富,灵敏度高。在发生励磁涌流时一般采用二次谐波制动原理来躲避涌流,但这可能造成空投内部故障或外挂空载长线发生内部故障时误闭锁保护,导致故障切除时间延长,影响快速性^[6-7]。对于 TA 饱和的影响,相量差动一般采用时差法来克服^[8]。但是时差法相对复杂,在发生外部故障转化为内部故障时,有可能将保护误闭锁,延长动作时间。此外,相量比率差动由于采用了长窗算法,容易受到干扰信号的影响,需采取措施进行处理,在某些场合,可能会降低保护的動作速度。

相比之下,采样值差动^[9-10]具有“天然的”躲励磁涌流和抗 TA 饱和的能力。采样值差动利用电流的采样值来构成保护判据,依靠连续 R 次采样判据中有 S 及以上次数符合动作条件才输出动作信号来保证可靠性($R>S$),与常规向量差动保护相比,具有动作速度快、计算量少、抗干扰能力强等特点。采样值差动不但考虑波形幅值的大小,更重要的是它需要考察波形的分布特点,因此,通过合理选择 R 与 S 的值,可在不降低内部故障动作速度的同时,有效防止励磁涌流和外部故障 TA 饱和引起的保护误动。采样值差动保护在实际应用中面临的主要问题是,为了提高躲励磁涌流和抗 TA 饱和的能力,其整定值需相应提高,且判据本身也具有一定的离散性,这些使得它在轻微内部故障时灵敏度有所降低。

根据相量差动保护和采样值差动保护的性特点,在主保护的方案设计中,采用了 2 种保护方法相互协调配合的工作模式,以充分发挥各自的优点,达到更好的综合保护性能。主保护以采样值差动保护为主,对大多数的内部故障可实现快速切除,且不受励磁涌流、TA 饱和及转换性故障的影响。当变压器内部发生轻微故障时,若采样值差动保护灵敏度不足,可由相量差动保护弥补。由于相量差动保护主要用于反应内部轻微故障,对其速动性要求可适当降低。在发生励磁涌流或外部故障 TA 饱和时,分别采用二

次谐波制动和TA饱和闭锁的方法防止保护误动。

为了进一步提高内部故障时保护的灵敏度,主保护方案中还配置了基于故障分量的相差动保护和零序差动保护。这些保护在原理上不受负荷电流的影响,在检测变压器内部小电流故障方面具有相当的优越性^[11]。

采取以上的多种保护相互配合的方式,原理简单,实现方便,各个保护元件之间能够取长补短,使保护装置的综合性能得到了进一步的改善和提高。

2.2 后备保护

相对于变压器主保护,变压器后备保护原理相对成熟,但保护元件众多,配置复杂^[12]。同时考虑到变压器的不同绕组和接线型式,以及不同应用场合,配置了较为齐全的后保护,主要包括过激磁保护、相间故障保护、接地故障保护和各种异常告警等。

其中,变压器过激磁保护反时限部分的动作特性曲线采用线性拟合原理^[13],曲线由多段直线组成,在计算出过激磁倍数后,采用分段线性插值求出对应的动作时间 t_{fg} ,再由动作时间算出单位热量累积:

$$\Delta Q = \Delta t / t_{fg} \quad (1)$$

式中 Δt 为采样时间间隔, $\Delta t = (20/N) \text{ ms}$ (N 为每工频周期的采样点数)。

当过激磁倍数大于下限值时,进行热量累积:

$$Q = Q + \Delta Q \quad (2)$$

反之,当过激磁倍数小于下限值时,进行散热:

$$Q = Q - k \Delta Q \quad (3)$$

式中 k 为散热系数。

当热量累积值 Q 大于上限定值时,反时限保护动作。

相间短路故障的后备保护主要包括复合电压闭锁方向过流保护和带偏移特性的阻抗保护2种基本形式。复压启动方向过流保护为改善功率方向元件性能,除传统的90°接线的功率方向元件外,增加负序功率方向元件^[14],前者用于反应三相故障,后者用于反应不对称故障。增加负序功率方向元件可提高元件的灵敏度和可靠性,即使对接地短路,或变压器其他侧短路,也能保证良好的动作性能。为防止变压器近区三相短路时三相电压过小失去方向性,当电压小于门槛值,而电流大于门槛值,则自动将电压取为有流侧的最高电压,以消除方向元件的电压死区。阻抗保护由于采用偏移特性,不存在死区问题,无需特殊考虑。

3 保护单元的软件设计

在装置的保护软件开发中,采用了基于继电器功能模块的程序设计方法。所谓基于继电器功能模块的设计方法即是仿照模拟式保护的结构形式,将模拟式保护中各“有形”的继电器用相应的软件功能模块来实现,将各功能模块的输出进行逻辑组合即可实现所需的保护功能。这种设计方式,将时序与逻辑分离,模块性好,结构清晰,软件的开发、维护方便,同时便

于记录、分析各“继电器”功能模块的动作情况和变化过程,为保护软件调试和事故情况下的保护动作行为分析提供了极大方便。

在各个继电器功能模块设计中,借鉴高级语言中面向对象的程序设计方法,把每个保护模块作为一个对象来看待,用结构体和函数调用来实现其功能^[15]。以差流速断保护元件为例,首先把保护判断需要的定值、电气量、软压板、控制字以及动作标志等封装成一个结构类型:

```
typedef unsigned char uchar;
struct StrDiffenceQuick
{
    //电气量定值:
    float *P_Set_Electric;
    uchar *P_Set_SoftSwitch; //保护软压板
    //输入量:
    float *P_ElectricA; //A相电流
    float *P_ElectricB; //B相电流
    float *P_ElectricC; //C相电流
    uchar *P_SignStart; //启动标志
    //输出量:
    uchar Sign_CritAAAction; //A相判据动作标志
    uchar Sign_CritBAAction; //B相判据动作标志
    uchar Sign_CritCAAction; //C相判据动作标志
    uchar Sign_Action; //元件动作标志
    uchar Sign_SOEAction; //元件动作 SOE 标志
    uchar Sign_SOEBack; //元件返回 SOE 标志
    //临时变量:
    uchar Sign_ActionOld; //元件动作标志映像
    short Temp_InnerT; //内部延时计时器
};
```

用此结构类型为该差流速断元件定义一个结构变量(分配内存空间):

```
struct StrDiffenceQuick Relay_DiffenceQuick;
同时,对该变量进行初始化并定义好相应的差流速断保护运行函数:
void DiffenceQuick(struct StrDiffenceQuick *Relay)
{
    ...//完成逻辑判断,相应的标志置位,SOE记录等
}
```

该运行函数的输入(参数)为保护元件的结构体指针,函数在每一采样间隔均被调用并输出逻辑判断结果,例如调用差流速断保护函数:

```
DiffenceQuick(&Relay_DiffenceQuick);
```

其中,Relay_DiffenceQuick即为差流速断保护元件对应的结构体变量,作为结构指针型参数传递给运行函数后运行函数给出逻辑判断结果(给Sign_Action置位),最后汇总所有保护元件的判断结果,利用跳闸矩阵进行跳闸出口的判断。

上述模块化设计方法,程序的可读性和可扩展性强,配置灵活,调试和维护方便。此外,也可以方便

地记录各保护元件动作的时序流程,实现软件透明化设计的要求。所谓透明化就是使每个保护元件都输出详细的动作逻辑标志(包含在结构体中),这些标志可精确地告知任一保护判据的实际动作情况。仍以差流速断保护为例,保护判据逻辑框图如图 3 所示。

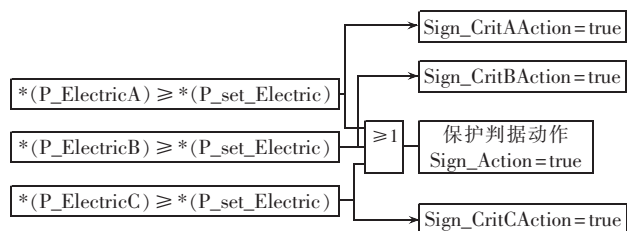


图 3 差流速断保护判据

Fig.3 Criteria of differential current instant protection

图 3 中,Sign_CritAAAction、Sign_CritBAAction 和 Sign_CritCAAction 分别在结构体 StrDiffenceQuick 中定义为 A 相、B 相、C 相差流满足判据的输出标志,这些标志在每次完成所有保护的判断后,连同其他保护元件的输出标志一起被记录到故障录波文件中的指定位置。例如,当变压器高压侧发生区内 AB 相间短路时,录波波形如图 4 所示,由图中可以清晰地看到差流速断保护的 A 相和 B 相判据快速动作,从而使差流速断保护迅速出口。可见,详细的逻辑量记录可使开发人员和用户清晰了解保护软件内部的每一个动作细节,大幅提高了开发调试的效率,并且使故障分析也有据可查。

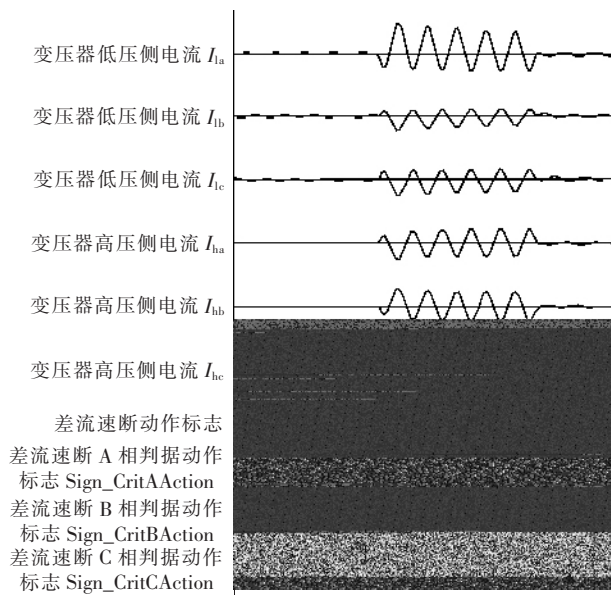


图 4 变压器高压侧区内 AB 相间短路录波波形

Fig.4 Fault records of internal inter-phase (A-B) short-circuit fault at high voltage side of transformer

4 结语

大型变压器保护装置的研制借鉴了诸多同类保护装置的开发与运行经验,在硬件设计、保护原理应用以及软件开发等方面进行了改进和完善。硬件平台以高性能的 TMS320C6713 DSP 处理器为核心构

成,并配备了带有嵌入式 Linux 操作系统的 ARM 处理器作为管理机,资源丰富,运行稳定可靠。主保护综合采用了多种保护原理,可充分发挥不同保护原理的优势,进一步提高保护的综合性能。采用的基于继电器功能模块的软件设计方法,大幅减小了软件开发和维护的工作量,并实现了保护内部动作逻辑的全程监测和记录功能。目前,所开发的保护装置已通过全面的实验测试,各项功能均达到设计要求,可满足大型变压器保护的应用要求。

参考文献:

- [1] 周泽昕,邱宇峰. 从动模试验情况看微机型发电机变压器保护的现状及存在的问题[J]. 继电器,2000,28(7):45-49.
ZHOU Ze-xin,QIU Yu-feng. Current situation and problems of microprocessor based generator and transformer protection based on dynamic simulation tests[J]. Relay,2000,28(7):45-49.
- [2] 黄勇,周又可. 发变组保护双重化过程中的几个问题与反思[J]. 继电器,2005,33(16):14-16.
HUANG Yong,ZHOU You-ke. Analysis of dual configuration for generator-transformer group unit protection[J]. Relay,2005,33(16):14-16.
- [3] 樊江涛,陈剑云,韦宝泉. ARM 处理器+DSP 构架的微机馈线保护装置的研制[J]. 电力系统自动化,2005,29(2):77-81.
FAN Jiang-tao,CHEN Jian-yun,WEI Bao-quan. Microcomputer-based feeder protection on ARM & DSP architecture[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(2):77-81.
- [4] 郑峰,田大海. CAN 总线在微机保护装置中应用[J]. 电力自动化设备,2006,26(11):83-86.
ZHENG Feng,TIAN Da-hai. Application of CAN-bus in micro-computer protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(11):83-86.
- [5] 王维俭,刘俊宏. 试论变压器差动保护的现状与发展[J]. 电力自动化设备,1996,16(4):8-13.
WANG Wei-jian,LIU Jun-hong. Present situation and development of differential protection for transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,1996,16(4):8-13.
- [6] 赵永彬,卢毅. 主设备变压器保护谐波制动改进[J]. 电力自动化设备,2002,22(7):1-5.
ZHAO Yong-bin,LU Yi. Advancement of central equipment transformer protection's harmonic restraint[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(7):1-5.
- [7] 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.
- [8] 李岩,陈德树,张哲,等. 鉴别 TA 饱和的改进时差法研究[J]. 继电器,2001,29(11):1-5.
LI Yan,CHEN De-shu,ZHANG Zhe,et al. Research of the improved time difference method to distinguish TA's saturation[J]. Relay,2001,29(11):1-5.
- [9] 胡玉峰,陈德树,尹根根. 采样值差动及其应用[J]. 电力系统自动化,2000,24(5):40-44.
HU Yu-feng,CHEN De-shu,YIN Xiang-gen. New differential protection of power apparatus based on sampled values and its application[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(5):40-44.
- [10] 陈德树,马天皓,刘沛,等. 采样值电流差动微机保护的一些问题[J]. 电力自动化设备,1996,16(4):3-8.
CHEN De-shu,MA Tian-hao,LIU Pei,et al. Problems in realization of microcomputer based differential current protection by sampled values[J]. Electric Power Automation Equipment,1996,16(4):3-8.

- [11] 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,2000,28(3):9-14.
YUAN Rong-xiang, CHEN De-shu, MA Tian-hao, et al. Study on the current differential protection based on sampled values using fault component—principle analysis[J]. Relay, 2000, 28(3):9-14.
- [12] 吴运祥,沈国荣,朱声石. 重视并应用好变压器后备保护[J]. 继电器,2000,28(7):8-11.
WU Yun-xiang, SHEN Guo-rong, ZHU Sheng-shi. Bring the backup protection for transformer into full play[J]. Relay, 2000, 28(7):8-11.
- [13] 李清波. 汕头 500 kV 变电站主变过励磁保护配置及运行管理[J]. 电力自动化设备,2001,21(1):54-56.
LI Qing-bo. Over excitation protection configuration of main transformer and operation management in 500 kV substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(1):54-56.
- [14] 黄晓晖. 发电机负序功率方向继电器动作分析[J]. 电力自动化设备,2001,21(2):30-31.

HUANG Xiao-hui. Action analysis of generator negative sequence power directional relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(2):30-31.

- [15] 李铁群,吴国阳,张涛. 基于模块的可编程保护装置软件设计新概念[J]. 电力系统自动化,2002,26(15):66-69.
LI Yi-qun, WU Guo-yang, ZHANG Tao. The new software design method of module-based programmable digital relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15):66-69.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

鲍凯鹏(1981-),男,山东青岛人,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护(E-mail: baokp@163.com);

张哲(1962-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统继电保护、变电站自动化及电力系统控制。

Development of microcomputer protection device for large transformer

BAO Kai-peng, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, WU Da-li

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: During the development of microcomputer protection for large transformer, its hardware design, software programming and protection principle integration are researched. It combines the main protection and the backup protection together, takes TMS320C6713 DSP as its protection CPU and ARM processor with Linux operating system as supervisor to meet the requirements of complex protection. The integrated application of different protection principles enhances its comprehensive performance. Based on the powerful hardware platform, the modularized software design based on relay functions makes the programs transparent, which increases development efficiency and simplifies software maintenance and expansion. The developed protection has already passed static and dynamic tests.

Key words: large transformer; microcomputer protection; hardware structure; software design

+++++