

适用于输电线路的单片机反时限过流保护

伍叶凯 上海交通大学(200030) 邹东霞 上海发电设备成套设计研究所(200240)

【摘要】 本文论述了一种用单片机实现反时限特性曲线的新技术,对所采用的分区查表法及其误差特性进行了分析,并且提出了硬件配置和软件设计方法。该方案具有较强的实用性。

【关键词】 反时限保护 分区查表 误差特性

前言

反时限电流保护的特性与很多负载的故障特性相似,因此在许多场合下比定时限保护的更为优越。反时限电流保护在国外已获较广泛的应用,而国内的中低压配电网中主要以定时限保护为主,这是由于传统的感应型反时限保护与定时限之间难以配合,从而限制了它的应用。近年来随着集成电路和微机等新技术的发展,反时限保护在我国也逐步得到推广和使用。

反时限过流保护通常基于如下的时间—电流反时限特性:

$$I^r \cdot t = K \quad (1)$$

式中的 r 根据保护的不同使用场合而取不同的值:一般在被保护线路首端和末端短路时电流变化较小的情况下,常采用定时限过流保护,定时限可以认为是一种特殊的反时限特性,即 $r = 0$;而在线路首末端短路时电流变化较大的情况下,则采用非常反时限特性,即 $r = 1$;通常输电线路采用一般反时限特性,即 $0 < r < 1$;反应过热状态的过流保护,则采用特别反时限特性,即 $r = 2$ 。

1 式所表示的反时限特性具有更通用的表达式:

$$t = \frac{K \cdot M}{(I/I_P)^r - a} \quad (2)$$

式中 K 是继电器的设计常数, M 是时间定值(由用户整定), I_P 为起动电流定值, a 是曲线移动常数, r 的含义同 1 式。

1 反时限特性曲线的实现

1.1 常用的三种反时限特性

根据国际电工委员会(IEC255)和英国标准规范(BS142)的规定,一般采用下列三种标准的反时限特性方程:

$$\text{一般反时限: } t = \frac{0.14}{(I/I_P)^{0.02} - 1} t_P \quad (3)$$

$$\text{非常反时限: } t = \frac{13.5}{I/I_P - 1} t_P \quad (4)$$

$$\text{特别反时限: } t = \frac{80}{(I/I_p)^2 - 1} t_p \quad (5)$$

其中 I/I_p 的含义同式 2, t_p 为时间整定常数, 可由用户整定。

1.2 三种反时限特性的实现方法

在 3、4 和 5 式中, 最难实现的是 3 式, 因为它具有 0.02 次方。早期采用电磁型继电器实现反时限特性, 后来使用整流型继电器通过电容的充放电实现。这两种方法均存在精度低、可靠性差等缺点, 这在一定程度上限制了反时限保护的应用。

文献^[1]提出了一种利用集成电路实现非常反时限 4 式的方法, 但是该方法却不能实现一般反时限 3 式和特别反时限 5 式。目前用集成电路实现 3~5 式的方法主要有两种: 对数指数法和曲线拟合法^[2]。

对数指数法主要利用指数式的电流电压元件来实现反时限特性, 由于这类电路的输出特性受环境温度影响, 对元器件的温度系数要求很苛刻, 因此这种方法的实现难度大, 实用性较差。

曲线拟合法的主要思想是将反时限特性曲线划分为若干段, 每段用一条集成电路容易实现的近似曲线来逼近。这种拟合法所产生的误差主要取决于段数的多少, 段数越多则误差越小, 但段数增加又导致电路复杂, 可靠性下降, 成本提高, 调试复杂等。目前使用的四段曲线拟合法, 实用性比对数指数法提高了, 但误差还有待减小。

本文根据单片机能够实时计算的特点, 直接利用软件实现各种反时限特性曲线, 下面以一般反时限为例说明:

一般反时限的特性方程 3 式中的系数为:

$$\frac{0.14}{(I/I_p)^{0.02} - 1} \quad (6)$$

由于目前单片机没有指数运算指令, 无法直接计算 6 式, 因此本文采用查表法来实现 6 式, 即事先将式中的数值计算好, 以表格形式存放在程序存储器 EPROM 中, 具体做法如下:

令 $t^* = t/t_p$, $I^* = I/I_p$, I^* 为故障电流倍数, 则 3 式化为:

$$t^* = \frac{0.14}{(I^*)^{0.02} - 1} \quad (7)$$

令 I^* 从 1.1 到 20 之间变化(这里假设故障电流的上限为 20 倍动作电流, 实际上, 当故障电流大于速断定值时可立即跳闸而无需查表), 变化步长为 ΔI , 即每隔 ΔI 计算一次 7 式, 并将算得的 t^* 值按表格形式存入 EPROM 中。在故障处理程序中, 根据实测的故障电流 I 计算出故障电流倍数 I^* , 再进行查表查出 t^* 的值, 然后根据用户整定的时间常数 t_p , 即可求出时间 t 。

步长 ΔI 的选取将直接影响精度, ΔI 越小则精度越高, ΔI 趋于零时, 查表法的误差也趋于零, 但这意味着需要存储的数据趋于无穷多个而难以实现。为了解决精度和存储容量之间的矛盾, 本文采取分区查表法, 分区方法见图 1 所示。

根据反时限特性曲线变化速率的不同, 将曲线分为三个区段: 在 1.1 $I^* < 2$ 的区间内, 由于特性曲线变化非常快, 为保证精度, 步长宜取得较小, 故取 $\Delta I = 0.001$; 在 2 $I^* < 6$ 的区间内, 特性曲线变化相对平缓, 取 $\Delta I = 0.01$; 在 6 $I^* < 20$ 的区间内, 特性曲线变化较前段更加平缓, 故取步长 $\Delta I = 0.05$ 。这样一条曲线共需要存储 1581 个数据, 如果每个数据以双字节浮点数存储, 则仅需要占大约 3K 字节的存储单元。如果非常反时限和特别反时限也采用查表法, 则三种反时限共需占 9K 多字节的存储单元, 对于目前普遍使用的 EPROM 27256 芯片, 其存储容量为 32K, 剩下的近 23K 字节用来存放程序指令已足够。因此, 采用查表法不会增加额

外的硬件开销。而且，一旦程序设计完毕，特性曲线也就确定，不受外界因素的影响，也无需调试。

对于 4 和 5 式，可按上述的分区查表法处理。在机时不紧张的情况下，也可直接计算出 t^* ，相对于 3 式中的 0.02 次方而言，4 式和 5 式还是容易实现的。

1.3 误差分析

在查表过程中，当 I^* 正好与表格中某一电流倍数 I^*_{k} 相等时，则可直接从表中查出

t^*_{k} ，当忽略有限字长引起的截断误差时，误差近似为零。但当 I^* 与表中任一电流倍数不相等时，如何获取 t^* 呢？主要有两种方法：直接查表法和线性插值法，下面分述这两种方法及其误差。

1.3.1 直接查表法

直接查表法的含义就是当 I^* 处于 $[I^*_{k}, I^*_{(k+1)}]$ 区间时，若 $I^* - I^*_{k} < \frac{\Delta I}{2}$ ，则取 $t^* = t^*_{k}$ ；若 $I^* - I^*_{k} > \frac{\Delta I}{2}$ ，则取 $t^* = t^*_{(k+1)}$ 。

显然，直接查表法的误差主要取决于步长 ΔI 和特性曲线的变化速率（特性方程的一阶导数的绝对值），步长越小则误差越小；曲线变化率越小，误差也越小。当 I^* 处于某一区段时，由于 ΔI 一定，误差只取决于曲线的变化率，进一步研究可发现：反时限特性曲线在整个区间 $[1, 20]$ 内皆是单调下降的，且其变化率在此区间也是单调下降的，因此在每个区段（即 $[1, 2]$ 、 $[2, 6]$ 和 $[6, 20]$ ）内，最大误差将出现在各区段的左边界附近（因为在每个区段的左边界，曲线的变化速率最大）。表 1 列出了 3、4 和 5 式三种反时限曲线在每个区间内的最大相对误差 $|e_{\max}|$ 。

表 1 直接查表法的最大相对误差

最大相对误差 反时限特性 区段	一般反时限	非常反时限	特别反时限
$[1, 2] \quad \Delta I = 0.001$	0.477%	0.5%	0.524%
$[2, 6] \quad \Delta I = 0.01$	0.363%	0.5%	0.668%
$[6, 20] \quad \Delta I = 0.05$	0.236%	0.5%	0.859%

由表 1 可见，采用直接查表法引起的最大相对误差，对于一般反时限和非常反时限，均不超过 0.5%，对于特别反时限也小于 1%，可见精度很高，能满足实际要求，另外，这种方法的计算量小，计算时间短（因为计算机擅长查表处理），因此具有较强的实用性。

1.3.2 线性插值查表法

见图 2 所示，线性插值法就是指当 I^* 处于 $(I^*_{k}, I^*_{(k+1)})$ 区间内时，近似认为在该步长区间的曲线段为一

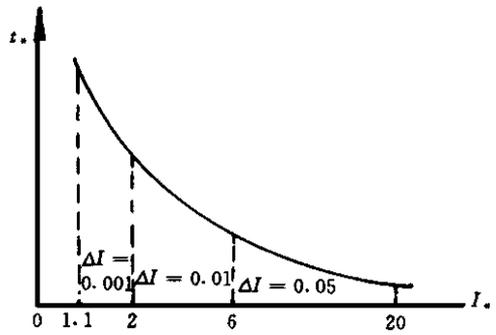


图 1 反时限特性曲线的分区

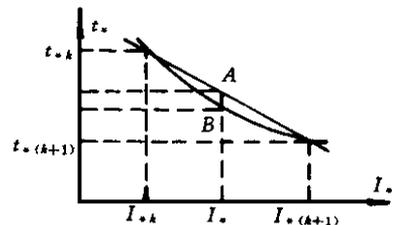


图 2 线性插值法示意图

直线段, 以对应同一个 I^* 值的直线上的点A 来代替曲线上的点B 来获得 t^* 值, 因此 t^* 可由下式求得:

$$t^* = t^*_{k+1} + \frac{t^*_{k+1} - t^*_k}{I^*_{k+1} - I^*_k} \cdot (I^* - I^*_k) \quad (8)$$

上式中 t^*_k 和 t^*_{k+1} 分别对应着故障电流倍数为 I^*_k 和 I^*_{k+1} 时的值, 可从表里查得, $I^*_{k+1} - I^*_k$ 即为步长 ΔI , 在不同的区段取不同的值。

线性插值查表法的误差取决于步长 ΔI 和特性曲线的曲率, 步长越小则误差越小; 曲率越小, 误差也越小。当步长一定时, 最大误差将出现在曲率最大的区域内。表 2 列出了三种反时限曲线在每个区段内的最大相对误差。

表 2 线性插值查表法的最大相对误差

最大相对误差 反时限特性 区段	一般反时限	非常反时限	特别反时限
[1, 1.2] $\Delta I = 0.001$	0.00236%	0.00248%	0.00260%
[2, 6] $\Delta I = 0.01$	0.00174%	0.00248%	0.00358%
[6, 20] $\Delta I = 0.05$	0.00103%	0.00248%	0.00551%

由表 2 可见, 采用线性插值查表法后, 精度可大大提高, 但计算量比直接查表法有所增加, 查表以后尚需计算 8 式。事实上, 由于步长 ΔI 分别为 0.001、0.01 和 0.05, ΔI 的倒数分别为 1000、100 和 20, 皆为确定的整数, 所以计算 8 式只需进行两次乘法和三次加法运算, 而对精度要求高且时机又不紧张场合, 采用线性插值查表法更为理想。

应当指出, 本文介绍的反时限实现法只适用于输电线路保护。对于应用于发电机、电动机等反应被保护对象过热状态的反时限元件保护, 宜采用动作电流对时间的积分算法来实现, 如 9 式所示, 因为积分算法比较容易模拟热量的积累与散发, 但积分算法受短路电流的暂态分量尤其是非周期分量的影响较大, 限于篇幅本文不作详细讨论。

$$\int_0^{t^*} [I^*(t) - 1] dt = Q \quad (9)$$

2 硬件配置

本保护的硬件配置如图 3 所示, 硬件系统主要包括数据采集系统、保护 CPU 系统、人机对话 CPU 系统和跳闸出口逻辑等部分。

数据采集系统的主要任务是将输入的模拟量(电流和电压)转换成数字量, 本装置利用压频变换器(VFC)配合计数器来构成模数变换器, VFC 型模数转换器的抗干扰能力强、工作稳定、精度高、线性度好, 与 CPU 接口简单, 本装置由于采用了最新推出的 VFC 芯片, 模数转换分辨率高达 14 位。为了能适用于双侧电源线路, 装置中设计了三相电流、三相电压和线路抽取电压共 7 路模入通道, 当用于单电源馈电线路时, 相应的电压模入通道元器件可不安装, 以节约成本。

保护 CPU 系统采用了不扩展单片机, 总线不引出芯片, 一块单片机芯片内部包括 RAM、EPROM、计数器、串行接口、并行 I/O 口等保护所需的全部外设功能, 有一些片内没有或不够的逻辑需要在片外扩展, 但也不用总线而是通过 I/O 线连接, 所有开关量输出输入回路均经过光电隔离, 跳闸出口回路里设有电气防跳单元, 以简化装置的外部接线。

人机对话 CPU 系统采用了具有很强网络功能的不扩展单片机, 总线不引出芯片, 其主要

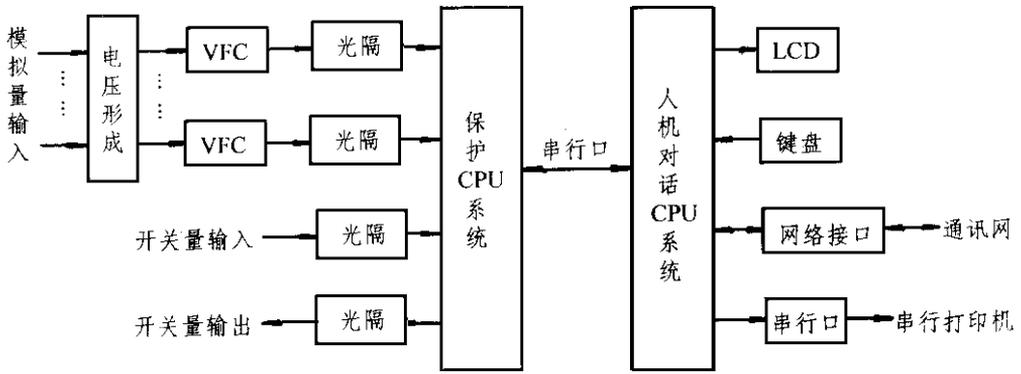


图3 硬件系统配置图

功能是人机对话和网络通讯。配有 4×16 液晶显示器,用以显示保护整定值、动作信息、模拟量数值、当前时钟等;设有 2×3 小键盘,用于输入命令和保护定值等;设有一个网络接口和一个串行打印机接口,重要信息可通过串行打印机就地打印,也可通过通讯网传给站内主机存盘或远传调度中心。

3 软件设计方案

为使本装置更具有通用性,软件中除设计了三种反时限特性曲线外,还设有三段式定时限过流保护模块,用户可通过控制字(软开关)选择,各段电流保护均可经电压闭锁;设有按 90° 接线原理构成的方向元件,方向元件与电流元件接成按相起动方式,以防非故障相方向元件误动,另外为消灭出口三相短路时的死区,方向元件带记忆功能;设有可供选择的低周减载功能,低周减载可经过滑差闭锁或低电压闭锁;设有三相一次重合闸,可通过控制字来控制重合闸投入或退出,以及采用前加速还是后加速方式。

对于反时限保护模块,也可以通过控制字由用户选择取用哪一种反时限特性。

图4示出了反时限保护模块的大致过程,起动元件动作进入故障处理程序后,首先查询控制字是否投入方向元件,若投入则进行方向判别:如果反方向故障则保护返回,如果为正方向故障,则继续查询控制字确定是否采用反时限保护,以及采用哪一种反时限。若采用反时限,先进行数字滤波计算出故障电流 I (取三相电流的最大值) 和故障电流倍数 I^* ,当 I 大于电流速断的定值时立即跳闸(或经固定延时跳闸,以躲过线路避雷器的放电)。当 $I^* < 1.1$ 时保护返回;当 $I^* \geq 1.1$ 时,进行查表并计算出 t 。如果 t 延时到,则发跳闸令;否则根据最新采样数据继续计算 I 和 I^* ,重新查表并计算出时间 t 。一旦 $I^* < 1.1$,保护立即返回,以防止故障发生在相邻线路时,由相邻线路保护切除故障后本保护误动。与积分算法相比,本方案受系统暂态过程的影响更小。(下转 35 页)

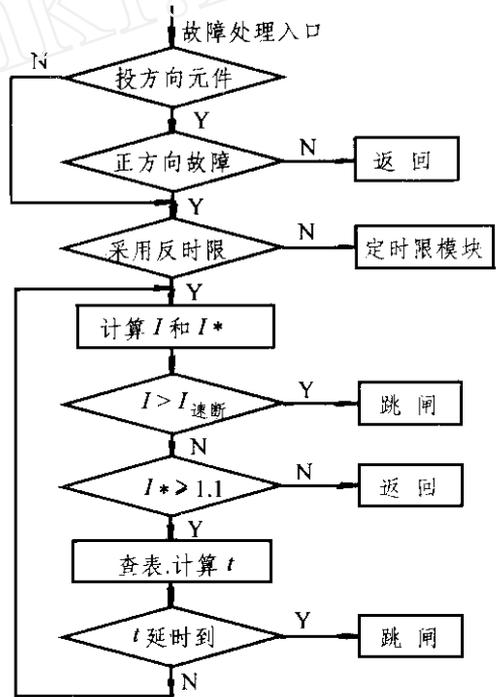


图4 故障处理过程

正向推理是从零件的初始状态,即毛坯状态开始,逐步选择合适的加工方法,直至能加工出符合最终要求的工序序列为止。

反向推理是从结论或目标出发,经过逆向链推出所存在的事实或数据,即从零件的最终状态——零件形状特征的图纸要求开始,反向逐步选择合适的加工方法,直至零件不再需要加工而回到毛坯状态为止。

由于反向推理与人们进行工艺设计的思维过程类似,而且将零件的设计要求作为唯一的目标,避免了盲目性,易保证质量,因而系统以反向推理为主。

为了协助推理机的有效推理,建立动态数据库,用以存放推理过程的中间结果。

5 系统开发特点

计算机辅助工艺过程设计系统非常复杂,除了工艺知识及专家经验知识的整理工作任务繁重外,软件的设计工作也十分繁重,因而选择高效的软件开发工具和优良的基础软件支持对缩短开发周期、节省开发费用等具有重要意义。

Turbo Prolog 语言是一种基于编译的人工智能语言,它具备很强的字符处理和逻辑推理机能,适合对专家知识进行处理。该语言系统内部的模式匹配和内部合一功能更易于推理机的实现,因此,在专家经验知识的处理和使用方面的程序用 Turbo Prolog 语言编写。

微软公司的 Auto CAD 软件具有极强的图形处理能力及用户二次开发接口,系统输出工序图部分是在 Auto CAD 上二次开发完成。

其它程序采用 Turbo C++ 语言编写。

由于采用模块化编程,每个功能子程序都是在系统的集成环境下被调用的,亦可单独运行,灵活性强而且维护简便。

用户在利用该系统进行零件的工艺流程设计时,有图形和对话框提示指导。另外,系统界面上采用下拉式中文菜单和图标技术,支持鼠标器和键盘,界面友善,操作简便。

由于生成的文件多,因而加强了文件的管理功能,包括文件的输出、打印、存贮、查询、修改及调用等都通过文件管理模块来实现。

参考文献

- 1 孟庆龙 电器制造工艺学(第2版). 机械工业出版社,1992年10月
- 2 Chang T. C and R. A. wysk. An Introduction To Computer Aided Process planning. Prentice Hall, 1985
- 3 付京孙等 人工智能及其应用 清华大学出版社,1987年

(上接25页)

4 结论

本文所提的方案已研制成样机,理论分析与实验表明,该方案具有高精度、高可靠性等优点,由于软硬件设计先进,保护装置具有体积小、功能全、抗干扰能力强等特点,适用于中低压输电线路,可作为综合自动化系统的一部分。

参考文献

- 1 姚致清 集成电路馈线保护装置 继电器,1993 1
- 2 杨仪松 具有最小定时限特性的反时限过流保护 电力系统自动化,1992