

J C D L B H K Z Y X H

杨宛辉 / 刘宪林 / 孙丰奇 编著

集成 电 路

保护控制与信号

N4
27

● 中国计量出版社

集成电路保护控制与信号

杨宛辉 刘宪林 孙丰奇 编著

中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

集成电路保护控制与信号/杨宛辉编著. -北京:中国计量出版社,1997.9

ISBN 7-5026-1001-4

I. 集… II. 杨… III. 集成电路-概论 IV. TN40

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 19567 号

内 容 提 要

随着电力系统不断扩大,单机容量不断增大,电力工业对继电保护、控制及信号装置提出了更高的要求。

本书主要包括如下内容:集成电路型继电保护装置的原理和组成;集成电路保护常用集成电路及其分析;集成电路型继电保护的测量回路、比较回路、时间电路、保护动作值整定电路和出口电路;小电流接地系统的集成电路线路保护;电力变压器、发电机和电动机集成电路保护;并联补偿电容器集成电路保护;集成电路控制与信号等。

本书可作为电力系统及其自动化专业和继电保护专业本科教材使用,也可供电力系统的工程技术人员参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

河北省永清县第一胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787×1092毫米 16开本 印张 10.5 字数 250千字

1997年9月第1版 1997年9月第1次印刷

*

印数 1—3500 定价:15.00元

前 言

随着电力系统不断扩大,单机容量不断增大,电力工业对继电保护、控制及信号装置提出更高的技术要求,促使这一领域技术进步。我们从 80 年代初就开始研究集成电路保护、控制与信号装置,研究的技术成果已成为许昌继电器厂及许昌继电器郑州研究所的定型产品,远销全国各地。我们自编讲义,两次应邀在电力部委托河南省电力局举办的集成电路保护研讨班授课,此讲义也作为选修课教材为本科生多次使用。以上是我们编写本书的基础。

全书共分十三章:第一、二、五、七、十章由杨宛辉撰写,第三、六、十三章由刘宪林撰写,第四、八、九、十一、十二章由孙丰奇撰写。杨宛辉任主编,并审阅全书。

因作者水平所限,难免有不妥或错误之处,恳请批评指正。

编者

1997 年 5 月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 继电保护装置的作用	(1)
§ 1.2 集成电路型继电保护装置	(1)
§ 1.3 集成电路保护装置的原理和组成	(3)
§ 1.4 集成电路型控制与信号装置的特点	(4)
第二章 集成电路保护常用的集成电路及其分析	(5)
§ 2.1 集成运算放大器	(5)
§ 2.2 CMOS 集成电路	(12)
第三章 集成电路保护的测量回路	(18)
§ 3.1 概述	(18)
§ 3.2 中间变换器	(18)
§ 3.3 整流电路	(23)
§ 3.4 滤波器	(31)
§ 3.5 移相器	(50)
§ 3.6 对称分量滤序器	(55)
第四章 比较回路	(65)
§ 4.1 比较器的基本电路	(65)
§ 4.2 具有滞环特性的比较回路	(66)
§ 4.3 反应单输入量瞬时值的比较回路	(68)
§ 4.4 相位比较器	(69)
§ 4.5 绝对值比较回路	(73)
第五章 时间电路	(75)
§ 5.1 充放电式延时电路	(75)
§ 5.2 计数器式延时电路	(77)
§ 5.3 脉冲展宽电路	(81)
§ 5.4 记忆电路	(83)
第六章 保护动作值整定电路	(85)
§ 6.1 概述	(85)
§ 6.2 无源连续整定电路	(85)
§ 6.3 有源连续整定电路	(86)
§ 6.4 有源离散整定电路	(88)
第七章 出口电路	(92)
§ 7.1 出口驱动器件	(92)
§ 7.2 出口电路	(93)

§ 7.3	无触点出口电路	(95)
§ 7.4	信号电路	(96)
第八章	小电流接地系统的集成电路线路保护	(99)
§ 8.1	小电流接地系统的保护配置	(99)
§ 8.2	三相重合闸	(99)
§ 8.3	单侧电源线路的集成电路保护	(102)
§ 8.4	双侧电源线路的集成电路保护	(103)
§ 8.5	平行线路的集成电路保护	(106)
§ 8.6	小电流接地系统中的单相接地保护	(110)
第九章	电力变压器的集成电路保护	(115)
§ 9.1	变压器的保护配置	(115)
§ 9.2	变压器集成电路纵差保护	(115)
§ 9.3	集成电路型变压器后备保护	(119)
§ 9.4	小容量变压器集成电路保护	(123)
第十章	发电机集成电路保护	(127)
§ 10.1	发电机保护的配置	(127)
§ 10.2	发电机纵差保护	(127)
§ 10.3	发电机转子接地保护	(130)
§ 10.4	发电机定子接地保护	(131)
§ 10.5	水轮发电机的过电压保护及调相运行时的低电压保护	(133)
第十一章	电动机集成电路保护	(135)
§ 11.1	电动机的保护配置	(135)
§ 11.2	电流速断保护	(135)
§ 11.3	电动机的过负荷保护	(136)
§ 11.4	电动机的低电压保护	(138)
§ 11.5	电动机的单相接地保护	(140)
第十二章	并联补偿电容器集成电路保护	(142)
§ 12.1	电容器的保护配置	(142)
§ 12.2	过电流保护	(142)
§ 12.3	零序电压保护	(143)
§ 12.4	不平衡电流或不平衡电压保护	(145)
§ 12.5	母线过电压保护	(146)
§ 12.6	失压保护	(147)
第十三章	集成电路控制与信号	(148)
§ 13.1	断路器控制	(148)
§ 13.2	中央信号	(156)
参考文献		(160)

第一章

绪 论

§ 1.1 继电保护装置的作用

电力系统在运行过程中,可能会出现故障或不正常的工作状态。常见的故障是各种情况的短路,其中包括:三相短路,两相相间短路,两相接地短路,一相接地短路以及发电机变压器绕组的匝间短路等。出现短路故障时,会引起电流增加、电压降低等物理现象,并产生如下严重后果:

- ① 由于短路点流过很大的短路电流和由它燃起的电弧,会烧坏或烧毁电气设备;
- ② 短路电流产生的发热和电动力,会损害短路电流通过的非故障设备或缩短它们的寿命。
- ③ 系统电压显著降低,使用户工作遭到严重破坏。
- ④ 破坏电力系统并列运行的稳定性,严重时甚至会造成整个系统瓦解等。

因此,当电力系统发生故障时,必须正确、迅速、可靠地切除故障设备,以防止事故扩大,保护非故障部分的可靠运行和电力系统的稳定。在极短时间内(秒、0.1 秒甚至 0.01 秒级)正确判断和切除故障,仅靠运行人员显然是不可能的。继电保护的作用就是帮助运行人员迅速发现与排除故障,保证电力系统安全运行。

电力系统运行中常见的不正常工作状态还有:电力设备的过负荷,发电机转子一点接地,小电流接地系统的单相接地等等。此时,并不要求立即切除不正常运行的设备,允许运行人员在一定时限内采取适当的措施进行处理。因此,继电保护装置的另一个作用是,正确反映电气设备的异常工作状态,通知运行人员迅速做出适当处理。

§ 1.2 集成电路型继电保护装置

电力设备最早的保护装置是 19 世纪末开始应用的熔断器,到 20 世纪初出现了感应型和电磁型的继电器,以及利用它们构成的各种类型的保护装置。几十年来,利用感应原理和电磁原理构成的传统继电保护装置,在特性上基本满足了电力系统的要求,它们具有使用年限长、机械强度较好、抗干扰能力强等优点,因此目前仍广泛地应用于 220kV 以下的电力系统中。

随着电力工业迅速发展,电力系统容量和单机容量的不断扩大,对继电保护技术提出了更高的要求。而传统的继电保护装置,由于动作速度慢,消耗功率多,灵敏度较低,体积大,抗振特性差以及有旋转可动部分和接点容易耗损等缺点,已不能满足大系统和大机组的要求。从 20 世纪 20 年代初至 50 年代,国外曾尝试用电子管做成继电器,但由于电子管造价高、寿命短、构造复杂,未得到广泛应用。随着半导体技术的发展,电子管式继电器很快被晶体管继电器所代替。晶体管继电保护装置和集成电路继电保护装置相似,均由电子元件等静止元件组成,因此统称为电子式静态保护装置。晶体管继电保护装置以其动作速度快,功耗小,灵敏度高,抗振

动,体积小以及由其本身可以构成复杂特性的继电器等优点,70年代以来,在电力系统中得到广泛应用。

晶体管继电保护装置的主要缺点是,由于电子元件多,焊点多,接插件多,容易因元件的特性变化和损坏,以及制造工艺不良而引起拒动和误动。同时,由于抗干扰能力差,进一步提高装置的可靠性也较困难。

集成电路是在半导体制造工艺的基础上,实现了元件、电路和系统三结合,因此它的密度高、引线短,外部接线和外接元件大为减少,从而提高了电子设备的可靠性和灵活性。各种高抗干扰集成电路的出现,进一步克服了由晶体管分立元件组成的电子设备抗干扰能力差、可靠性不高等缺点。可以说集成电路已成为电子技术最重要的基础产品之一,它已广泛地深入于各个应用领域。集成电路继电保护装置以它突出的优点,成为第二代静态继电保护装置,替代了第一代晶体管型静态继电保护装置,广泛应用于电力系统,成为静态继电器的主要形式,满足了当前电力系统的高电压、大容量发展的需要。

集成电路保护装置具有以下特点:

(1) 由静止回路构成无可动部分

集成电路将众多的元器件及其连接线一次制造成功,由它构成的集成电路保护装置,只需加少许电阻、电容等静止元件,因此它具有动作速度快,无触点出口的保护动作时限可以以微秒计,就是有接点出口也可以做到毫秒级;不存在可动部分,因此没有可动部分的磨损、接触不良等问题;耐冲击、抗振动,防止了因振动造成误动作等。

(2) 灵敏度高

由于集成电路的触发功率很小,并有放大作用,所以可以制成灵敏度很高的保护装置。

(3) 利用集成电路固有特性可以较容易构成复杂的保护装置

采用电磁型原理构成复杂保护时,要利用许多继电器组合,结构复杂且不易协调配合,很难满足大系统和大机组所需复杂保护的要求,而利用集成电路很容易做到复杂特性的保护。如我们将要介绍的 CMOS 集成电路,它们不仅具有较强的逻辑运算功能,而且仅外接少量元器件就可构成各种触发器、时间电路、振荡电路等。又如作为模拟集成电路的线性集成运算放大器,外接各种不同的反馈电路,可以构成加法、减法、乘法、微分、积分等继电保护需要的运算电路,以及比较器、触发器、移相器、时间电路等。集成电路的这些基本特性和各种电子新技术,可以构成许多新原理、新特性以及电磁型原理难以实现的复杂特性保护装置,从而探索出电子技术为电力系统继电保护应用更广泛的途径。

(4) 体积小

晶体管保护装置的体积已经比电磁型保护装置的体积大为减小,而集成电路保护装置的体积又进一步减小。对于简单的保护,往往一个插件可以集成一套或两套完整的保护装置,即使复杂保护,也只需要 2 个或 3 个插件。这不仅缩小了配电装置的占地面积,而且由于焊点少、接线少、制造工艺简单,使保护装置的可靠性得以提高。

(5) 消耗功率小

由于集成电路消耗的功率小,也减轻了电压互感器和电流互感器的负担,可以减小电压互感器和电流互感器的容量。

(6) 调试维护方便

集成电路保护结构简单,没有旋转可动部分,很容易实现自检功能,保护装置的调试、维护

工作也简单方便。

集成电路保护的抗干扰能力虽然比晶体管保护有所提高,但因它们同属弱电保护,且动作速度快、灵敏度高,容易受到来自交流和直流系统干扰波的影响而发生误动作。因此,提高抗干扰能力仍是提高集成电路保护可靠性的重要技术之一。目前已定型生产的集成电路保护装置,在抗干扰方面均做了大量工作。

§ 1.3 集成电路保护装置的原理和组成

继电保护装置应具有正确区分被保护设备是处于正常运行状态还是不正常工作状态或者是发生了故障的能力。若被保护设备处于故障或不正常工作状态,继电保护装置应能迅速、有选择地切除故障设备或发出信号。保护装置实现这一功能,是以被保护设备的某些物理量变化特征为基础的。

我们知道,电力系统发生故障时,一般情况下总是伴随有电流增大、电压降低、电压和电流之间相位角变化、线路始端测量阻抗减小等等电气物理量的变化。除此之外,根据电气设备的特点,故障时也有非电量的变化,如绕组、铁芯温度的升高或变压器油箱内由于短路故障发热引起的油被分解产生大量瓦斯气体等等。因此,应用于电力系统的继电保护装置大多数以反映这些物理量的变化为基础,构成不同原理的保护装置。如反映电流增大的电流保护,反映电压降低的低电压保护,反映电流电压相位变化的方向保护,反映阻抗值变化的距离保护,反映温度变化的过温保护,反映瓦斯气体的瓦斯保护等等。

与电磁式保护装置、晶体管保护装置相同,集成电路保护装置是由测量部分、逻辑部分和执行部分组成的,其原理结构框图如图 1—1 所示。

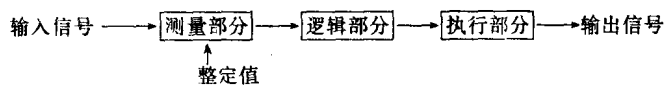


图 1—1 继电保护装置原理结构框图

(1) 测量部分

测量部分一般由电压形成回路和整流、滤波回路构成,它接收从被保护对象输入的相应电量并反映其变化,并与已给定的整定值进行比较,根据比较结果来确定是否发生故障或不正常工作状态,然后输出相应信号至逻辑部分。

(2) 逻辑部分

逻辑部分的作用是根据由测量部分输入的动作信号决定保护的動作程序,使保护装置按一定的逻辑关系工作,如确定是否应该作用于断路器跳闸或发信号,并将相应的命令输入到执行部分。

(3) 执行部分

执行部分根据逻辑部分送来的动作信号,正确执行保护装置担负的任务。如故障时动作于断路器跳闸,以及经信号回路发出相应的灯光、音响信号等。

§ 1.4 集成电路型控制与信号装置的特点

1. 集成电路型控制与信号装置的特点

发电厂和变电所的控制,是指对其电气设备的操作与控制。而信号是为了帮助运行人员掌握电气设备工作状态,事故时可迅速判断出事故性质、范围和地点。如某设备正常运行时其断路器处正常工作状态,断路器合闸指示灯发红色平光,该设备事故跳闸后,其绿灯发闪光,同时中央信号装置发出音响及光字牌等事故信号。可见,控制与信号装置对发电厂和变电所十分重要。

以往,发电厂和变电所电气设备的控制与信号多采用电磁式装置,目前集成电路型控制与信号装置以其独特的电路特点已得到较广泛地应用。如对断路器的控制,通过选线操作及其闭锁功能,使误操作的可能性大为减少。而它所具有的亮盘和暗盘运行方式,使观察清晰,更加有利于运行操作和事故处理。又如,采用电磁式冲击继电器构成的中央音响系统,信号重复次数有限,一般最多可接受十多个重复信号。若采用集成电路微分器构成的音响电路,可组成任意规模重复动作的中央音响报警系统,同时可以实现事故停钟等多种功能。

所以,集成电路控制与信号装置同集成电路保护装置一样,具有结构紧凑,能耗小,可靠性高,操作、调试、维护方便及投资少等特点。

2. 集成电路控制屏台结构布置型式

集中控制室的集成电路控制屏台的结构型式可以分为屏台分开和屏台合一型式。

(1) 屏台分开型

是指在控制台后面设有独立的返回屏,返回屏上有模拟接线、测量仪表以及反映断路器和隔离开关的位置信号等。在控制台上操作时,操作对象在屏上有相应显示,故称返回屏。这种结构型式操作清晰,检修调试方便,但占地面积大,结构复杂。一般用于主接线复杂,被控对象较多的大中型厂、站。

(2) 屏台合一型

即取消返回屏,在控制台的直立面上布置测量仪表、光字牌等,台面上布置控制开关、选线按钮等。它的特点是结构更紧凑,占地小,节省控制电缆。常用于主接线简单,被控对象少的厂、站。

第二章

集成电路保护常用的集成电路及其分析

§ 2.1 集成运算放大器

1. 运算放大器的基本特性

大多数集成运算放大器(以下简称运算放大器),都是双端输入和单端输出的高增益直流放大器,一般用图 2—1 所示三角符号表示。

图中符号“-”表示运算放大器的反相输入端, u_- 是反相输入端对地电压;符号“+”表示运算放大器的同相输入端, u_+ 是同相输入端对地电压。 u_{sc} 表示输出端的输出电压。信号从同相端输入时,输出信号与输入信号同相位,信号从反相输入端输入时,输出信号与输入信号相位相反。

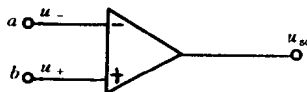


图 2-1 运算放大器的图形符号

为便于分析应用,引入理想运算放大器的概念,理想运算放大器具有如下基本特性:

(1) 开环增益 K_0 。

开环增益也称开环电压放大倍数,它等于运算放大器开环时,输出电压与两个输入端输入电压差之比:

$$K_0 = \frac{u_{sc}}{u_+ - u_-}$$

实际运算放大器的 K_0 值一般是 80~120 dB,它对应的直流开环电压放大倍数为 $10^4 \sim 10^6$ 。因此,应用分析时可以认为 K_0 为无限大,即 $K_0 \approx \infty$ 。

(2) 输入特性

运算放大器的开环输入电阻很大,一般差模输入电阻为 $10^5 \sim 10^{11} \Omega$,共模输入电阻在 $10 M\Omega$ 以上。应用中信号源的电阻很小,因此可以认为运算放大器的输入电阻为无限大,即 $r_{sr} \approx \infty$ 。

(3) 输出特性

大多数集成运算放大器都采用互补射极跟随器做输出电路,其输出电阻一般为几十 Ω 到几百 Ω ,个别运算放大器输出电阻达到 $k\Omega$ 级。但由于运算放大器总是在深度反馈条件下工作,因此闭环输出电阻要比上述数值小得多,所以可以假设运算放大器的输出电阻 r_{sc} 趋于无限小,即 $r_{sc} \approx 0$ 。

(4) 失调和漂移特性

由于集成电路制造工艺的不断改进和提高,使集成运算放大器的失调和漂移不断减小。一般应用中可以认为其输入失调电压及其漂移、失调电流及其漂移都为零。

由以上特性可以得出理想运算放大器的两条重要结论:

第一,流入运算放大器内部的输入电流 i_{sr} 趋于零。因为运算放大器的输入电阻 r_{sr} 为无限

大, $u_+ - u_-$ 为有限值, 而 $i_{sr} = \frac{u_+ - u_-}{r_{sr}}$, 所以 $i_{sr} \approx 0$ 。这就是说运算放大器基本上不从外部电路索取电流, 在运算放大器的两个输入端都没有输入电流。

第二, 同相端电位等于反相端电位, 即 $u_+ = u_-$ 。因为在两个输入端加电压 $u_{ab} = u_+ - u_-$ 时, 输出电压为 u_{sc} , 那么有 $u_{sc} = K_o(u_+ - u_-)$ 。因为 $K_o \approx \infty$, 而 u_{sc} 为有限值, 所以 $u_+ - u_- = \frac{u_{sc}}{K_o} = 0$, 或表示为 $u_+ = u_-$ 。

这两条结论是由理想运算放大器的特性得出的, 对实际的运算放大器也基本正确, 因此这两条重要结论, 将成为分析运算放大器的出发点。

2. 运算放大器的分析方法

从上述理想运算放大器的两条重要结论出发, 可以用“零子”和“任意子”表示理想运算放大器的等效电路, 如图 2—2 所示。

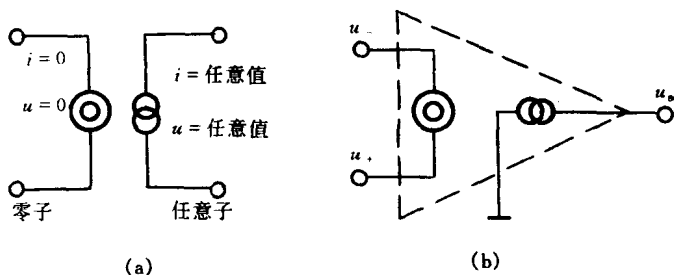


图 2—2 用零子和任意子表示的理想运算放大器的等效电路

(a) 零子和任意子; (b) 等效电路

所谓“零子”是指流经零子的电流和加在零子两端的电压始终为零, 而与外界电路条件无关; 所谓“任意子”是指流经任意子的电流和加在任意子两端的电压都可以为任意值, 具体数值完全由外界电路条件决定。“零子”和“任意子”是一种理想化的电路元件, “零子”的性能与理想运算放大器的输入特性完全相同, 故从运算放大器输入端视入时, 它相当于一个“零子”, 而从输出端视入时, 它相当于一个“任意子”。

依据图 2—2(b) 所示等效电路, 能简便得出应用电路的各种电量关系, 具体步骤是: 将电路中运算放大器等效电路的“零子”, 看成电流为零, 电压差也为零的电流源, 把与“任意子”相连的节点除外, 而对其余节点按基尔霍夫电流定律, 用节点法列出相应个数的独立电流方程, 再附加“零子”约束条件建立的另一个独立方程, 解上述联立方程, 就可以得出电路的各种电量关系。在后面具体应用电路分析中, 将用到这种分析方法。

3. 反相运算电路

在运算放大器的各种运算电路中, 如果输入信号从反相输入端加入, 同相输入端接 0V 电位, 便属于反相运算电路。反相运算电路是运算放大器应用电路中最基本的类型, 在继电保护电路图中用得比较多, 图 2—3 是这种电路的原理图。

图 2—3 中的 Z_D 叫做补偿回路阻抗, Z_F 叫做反馈回路阻抗, 在其反相输入端有 n 个输入信号 $\dot{U}_{sr1}, \dot{U}_{sr2}, \dots, \dot{U}_{srn}$, 它们的输入阻抗分别是 $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ 。输入回路电流 $\dot{I}_{f1}, \dot{I}_{f2}, \dots, \dot{I}_{fn}$ 和反馈回路

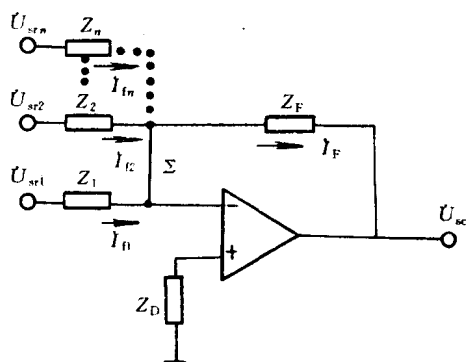


图 2-3 反相运算电路

电流 I_F 的正方向如图所示。因为各输入回路的电流在反相输入端相加,所以“ $-$ ”端称做相加点,即“ Σ ”点。为保证运算放大器外接电路对称,使从反相输入端和从同相输入端向外部看到的等效阻抗相同,以便消除放大器偏置电流及其漂移的影响,补偿阻抗参数选择时应满足 Z_D 等于反馈电阻 Z_F 和各路输入阻抗的并联值,即

$$Z_D = \frac{1}{\frac{1}{Z_F} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}} \quad (2-1)$$

根据零子的概念,由于流入运算放大器内部的电流为零和反相端电位等于同相端电位,那么对“ Σ ”点应用基尔霍夫电流定律有

$$\dot{I}_{i1} + \dot{I}_{i2} + \dots + \dot{I}_{in} = \dot{I}_F$$

并有 $\dot{U}_+ = \dot{U}_- = \dot{U}_\Sigma = 0$

从而可以推出 $\frac{\dot{U}_{sr1}}{Z_1} + \frac{\dot{U}_{sr2}}{Z_2} + \dots + \frac{\dot{U}_{srn}}{Z_n} = -\frac{\dot{U}_{sc}}{Z_F}$

化简后得:

$$\dot{U}_{sc} = - \left[\sum_{i=1}^n \frac{Z_F}{Z_i} \dot{U}_{sri} \right] \quad (2-2)$$

式(2-2)的相应拉氏变换形式为

$$U_{sc}(s) = - \left[\sum_{i=1}^n \frac{Z_F(s)}{Z_i(s)} u_{sri}(s) \right] \quad (2-3)$$

式中 $u_{sc}(s)$ 和 $u_{sri}(s)$ 分别是运算电路输出信号 $u_{sc}(t)$ 和各路输入信号 $u_{sr}(t)$ 的拉氏变换,即

$$U_{sc}(S) = \int_0^{\infty} u_{sc}(t) e^{-st} dt$$

$$U_{sr}(S) = \int_0^{\infty} u_{sr}(t) e^{-st} dt$$

而式(2-3)所示拉氏变换方程中,电阻、电感和电容也分别以拉氏变换形式表示成 R 、 Is 和 $\frac{1}{Cs}$

式(2-2)、(2-3)是反相运算电路运算方程的一般形式,从中可以看出,运算放大器具有理想特性时,反相运算电路的输出电压是输入电压的代数和,各相加项的系数仅与外接电路阻抗相关,而与运算放大器本身参数无关。适当选择外接阻抗的参数,就可以得到具有不同特性的运算电路。式中的负号表明,输出电压相位与输入电压相位相反,所以称之为反相运算电路。同时,还可以看到这种电路反相输入端的电位接近于 0V,反相运算电路的这种现象称作虚地现象,反相端又称作虚地点。由此可得,每个输入信号的输入阻抗,就是输入电路本身的阻抗,这是反相运算电路的又一特点。利用式(2-3)和图 2-3 可以拟制出各种继电保护所需运算电路。

(1) 反相比例运算放大电路

将图 2-3 中输入回路减为一回,并将输入回路阻抗、反馈回路阻抗和补偿回路阻抗均改

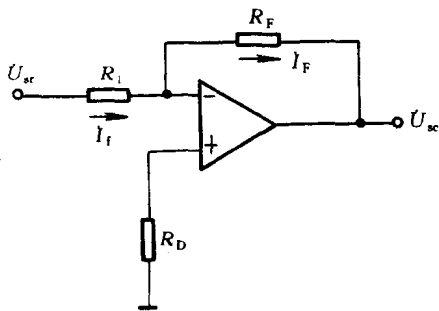


图 2-4 反相比例运算放大电路

为电阻,就可以得到图 2—4 所示的反相比例运算放大电路,它是反相运算电路的一种基本形态,或者说是一种特例。由反相运算电路的一般形式可以推出反相比例运算电路各电量关系有

$$\dot{I}_i = I_F$$

$$\dot{I}_i = \frac{\dot{U}_{sr}}{R_1}$$

$$\dot{I}_F = \frac{\dot{U}_{sc}}{R_F}$$

从而得到

$$K_F = \frac{\dot{U}_{sc}}{\dot{U}_{sr}} = -\frac{R_F}{R_1} \quad (2-4)$$

式(2—4)中, K_F 叫做反相比例运算放大电路的理想闭环增益,或称放大倍数。式(2—4)表明,在理想特性条件下,运算放大器的闭环增益 K_F 仅与外部电路参数 R_1 和 R_F 有关,而与运算放大器内部参数无关,选用不同的 R_1 与 R_F 阻值,可得到不同的 K_F 值。由于电阻的精度和稳定性很高,所以闭环增益 K_F 的精度和稳定性也很高,这是运算放大器在深度负反馈条件下工作的一个突出优点。

(2) 反相加法运算电路

图 2—5 是反相加法运算电路的一个实例,若取

$$\frac{R_F}{R_1} = \frac{R_F}{R_2} = \frac{R_F}{R_3}$$

$$\dot{U}_{sr1} = \dot{U}_A = \dot{I}_A R$$

$$\dot{U}_{sr2} = \dot{U}_B = \dot{I}_B R$$

$$\dot{U}_{sr3} = \dot{U}_C = \dot{I}_C R$$

其中 R 是每相中间电流变换器二次侧所接电阻,将它们代入式(2—2)有

$$\dot{U}_{sc} = -\frac{R_F}{R_1}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = -\frac{RR_F}{R_1}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = -\frac{3R_F}{R_1}\dot{I}_0 R$$

可见这是一个零序电流过滤器,由于电阻的精度和稳定性很高,所以用这种电路构成零序电流过滤器的精度和稳定性也很高。

(3) 积分运算电路

图 2—6 是基本积分电路的原理图,它的输入回路阻抗是电阻,反馈回路阻抗是电容,将它们的拉氏变换形式 $Z_1(s) = R, Z_F(s) = \frac{1}{Cs}$ 代入式(2—3)则得:

$$U_{sc}(s) = -\frac{1}{RCs}U_{sr}(s) \quad (2-5)$$

令 $\tau_F = RC$, 习惯上称 τ_F 为时间常数,将 τ_F 代入式(2—5),并对式(2—5)进行反拉氏变换后得:

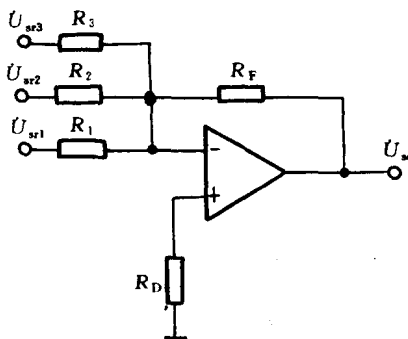


图 2-5 反相加法运算电路

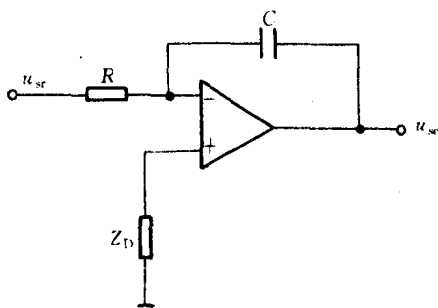


图 2-6 积分运算电路

$$u_{sc}(t) = -\frac{1}{\tau_F} \int_0^t u_{sr}(t) dt \quad (2-6)$$

可见积分运算电路实现了对输入电压信号的积分运算,用传递函数形式表示积分运算电路输入输出关系有

$$K_F(s) = \frac{U_{sc}(s)}{U_{sr}(s)} = -\frac{1}{RCs} = -\frac{1}{\tau_F s} \quad (2-7)$$

若输入信号 $u_{sr}(t)$ 是直流电压,即阶跃电压 E ,那么将 $u_{sr}(t) = E$ 代入式(2-6),可以得到:

$$u_{sc}(t) = -\frac{E}{RC}t = -\frac{E}{\tau_F}t \quad (2-8)$$

从式(2-8)可见输入阶跃电压时,积分运算电路的输出电压与输入电压相位相反,而幅值随时间呈线性增长。显然,此电路在继电保护中可做时间元件,它也是集成电路继电保护装置的一种基本电路。为保证时间元件的精度,它应该工作在积分运算电路的线性范围内,因此参数选择时,应保证积分运算电路的输出电压,不超过运算放大器的最大输出电压 $|U_{scm}|$ 即

$$|u_{sc}(t)| = \left| -\frac{E}{\tau_F}t \right| \leq |U_{scm}| \quad (2-9)$$

由于在这种电路中,输入回路所加的直流电压 E ,一般都是前一级运算放大器的最大输出电压,可以近似认为 $|E| \approx |U_{scm}|$,因此式(2-9)又可以简化成:

$$t \leq \tau_F \quad (2-10)$$

式(2-10)中 t 是时间元件的动作时间,可见应根据所需时间 t 选择积分电路的 R 和 C 值,使之满足 $t \leq \tau_F = RC$ 这一条件。

(4) 微分运算电路

微分运算电路用来实现对输入信号 $u_{sr}(t)$ 的微分运算,从数学上讲,微分与积分为反函数运算,从电路构成上看,它们成对偶形式,也就是说,它们的输入回路与反馈回路的元件位置互换,微分运算电路原理图如图 2-7 所示。用上述分析方法将 $Z_1(s) = \frac{1}{CRs}$ 和 $Z_F(s) = R$ 代入式(2-3)得:

$$U_{sc}(s) = -sRCU_{sr}(s) \quad (2-11)$$

上式的拉氏反变换为

$$u_{sc}(t) = -RC \frac{du_{sr}(t)}{dt} \quad (2-12)$$

令 $\tau_F = RC$,用传递函数表示其输入输出关系则有

$$K_F = \frac{U_{sc}(s)}{U_{sr}(s)} = -RCs = -\tau_F s \quad (2-13)$$

当输入电压为直流电压或称阶跃电压 E ,即 $U_{sr}(s) = \frac{E}{s}$ 时,代入式(2-11)后的拉氏反变换为

$$u_{sc}(t) = -RCE\delta(t) \quad (2-14)$$

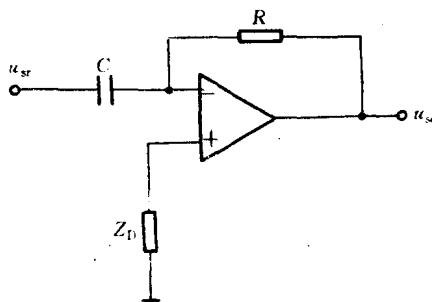


图 2-7 微分运算电路

式中, $\delta(t) = \begin{cases} \frac{1}{t_0} [0 < t < t_0 (t_0 \rightarrow 0)] \\ 0 [t < 0, t > t_0 (t_0 \rightarrow 0)] \end{cases}$ 为单位冲激函数。由此可知, 输入信号是直流电压时, 微分运算电路的输出电压为一脉冲电压。如果输入信号为交流正弦电压 $u_{sr}(t) = U_m \sin \omega t$, 代入式(2—12)输出电压为

$$u_{sc}(t) = -RC\omega U_m \cos \omega t \quad (2-15)$$

由式(2—15)可见, 输出电压将随输入电压信号频率的增高而加大, 因此微分运算电路可以视为一个简单的高通滤波器。如此看来, 图 2—7 所示的微分运算电路有明显的弱点: 首先, 由于它对高频信号有较高的增益, 故使之易受高频噪声干扰的影响; 其次, 其输出脉冲电压的幅值高, 宽度窄, 电路工作不稳定; 还有其输入阻抗取决输入回路电容, 即 $X_C = \frac{1}{j\omega C}$, 故高频信号输入时, 输入阻抗不大; 同时, 由于反馈回路构成另一个 RC 滞后环节, 它和运算放大器内部的滞后环节合在一起, 将使稳定储备降低, 易产生自激振荡等。

为克服上述弱点, 可采用图 2—8 所示的一阶阻尼微分运算电路, 其输出电压为

$$U_{sc}(s) = \frac{R_F}{R} \cdot \frac{s}{s + \frac{1}{RC}} \cdot U_{sr}(s) \quad (2-16)$$

将 $U_{sr}(s) = \frac{E}{s}$ 代入式(2—16)并进行拉氏反变换有

$$u_{sc}(t) = \frac{R_F}{R} E e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2-17)$$

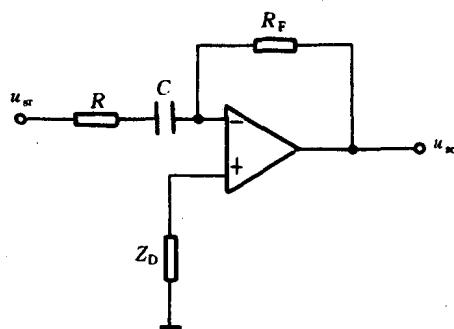


图 2—8 一阶阻尼微分电路

可见, 输出电压 u_{sc} 是一按指数衰减的脉冲, 其特性明显优于式(2—14)。为进一步提高微分运算电路的稳定性, 可在图 2—8 所示电路的反馈电路 R_F 两端再并联一个电容。

4. 同相运算电路

与反相运算电路相似, 凡输入信号从运算放大器同相端输入的运算电路叫同相运算电路, 它也是应用电路中最基本的类型, 其典型电路如图 2—9 所示。

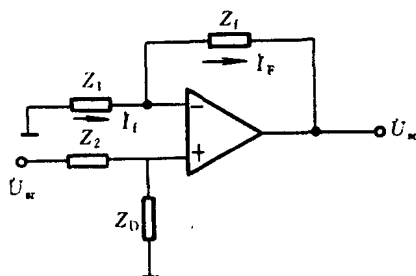


图 2—9 同相运算电路

仍然利用理想运算放大器的两条重要结论分析, 从零子的概念出发必然有

$$\dot{I}_i = \dot{I}_F, \dot{U}_+ = \dot{U}_-$$

从图 2—9 可见

$$\dot{U}_+ = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_D} \cdot \dot{U}_{sr} = \dot{U}_- \quad (2-18)$$

因

$$\dot{I}_i = -\frac{\dot{U}_-}{Z_1}, \dot{I}_F = -\frac{\dot{U}_{sc} - \dot{U}_-}{Z_F}$$

将式(2—18)代入这两个方程可得:

$$\dot{U}_{sc} = \left(\frac{Z_2}{Z_2 + Z_D} \right) \left(1 + \frac{Z_F}{Z_1} \right) \dot{U}_{sr} \quad (2-19)$$

用拉氏变换表示成

$$U_{sc}(s) = \frac{Z_2(s)}{Z_2(s) + Z_D(s)} \left[1 + \frac{Z_F(s)}{Z_1(s)} \right] U_{sr}(s) \quad (2-20)$$

式(2—19)、(2—20)是同相运算电路运算方程的一般形式,可见同相输入时,输出电压与输入电压同相,由式(2—19)、(2—20)可以拟制出集成电路保护所需的基本电路。

(1) 同相比比例运算放大电路

同相比比例运算放大电路,是同相运算电路的一种基本形态,图 2—10 是它的原理图。

利用上述同相运算电路的分析方法,可以得到图 2—10 中同相比比例运算放大电路的运算方程

$$u_{sc} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1} \right) u_{sr} \quad (2-21)$$

其输出输入关系 K_F 为

$$K_F = \frac{u_{sc}}{u_{sr}} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (2-22)$$

K_F 也称为同相比比例运算放大电路的理想闭环增益,简称理想增益或放大倍数。与反相比比例运算电路相同,同相比比例运算放大电路的理想增益 K_F 仅与外部电路的 R_F 、 R_1 阻值有关,而与放大器本身的参数无关,因此,增益的精度与稳定度均很高。由式(2—22)还可以看出,同相比比例运算放大电路的增益总是大于或等于 1,而不会小于 1,这是与反相比比例运算放大器的不同之处。

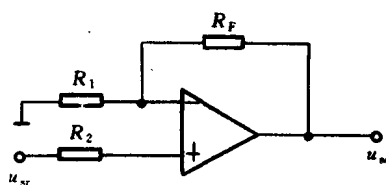


图 2—10 同相比比例运算放大电路

由式(2—18)可以看出,同相比比例运算放大电路的同相端和反相端电压不是零,而是接近于输入电压,即加有共模电压,这是同相运算电路的又一特点。因此,同相运算放大器应具有较好的共模抑制能力和较大的共模电压工作范围,若输入电压超过运算放大器的允许共模输入电压范围必须加保护措施,否则会产生堵塞现象,而影响其正常工作。

当运算放大器具有理想特性时,同相运算电路的输入阻抗显然是无穷大,所以它的输入阻抗远大于反相运算电路的输入阻抗。

由上述分析可见,同相比比例运算放大电路与反相比比例运算放大电路特性有明显差别,使用时应注意。

(2) 电压跟随器

根据同相比比例运算放大电路输入阻抗高、输出阻抗低的特点,将它改进成图 2—11 所示的电压跟随器,即 $R_F = 0$, $R_1 = \infty$,将其代入式(2—21)和(2—22),可得电压跟随器方程

$$u_{sc} = u_{sr} \quad (2-23)$$

$$K_F = \frac{u_{sc}}{u_{sr}} = 1 \quad (2-24)$$

可见,电压跟随器的理想增益等于 1,因此也称它为电压跟随器。应用中将它置于隔离的两个电路之间,它的输入阻抗高,从前级电路索取的电流极少,它的输出阻抗低,可向后级电路提供一定的负载电流。因此在继电保护电路中,常采用电压跟随器作信号隔离电路。