

晶体管技术在电力系统继电器 和保护装置中的应用

许昌继电器研究所 马昌硕译 朱景云校

内 容 提 要

虽然二十多年前就对静态继电器开始了积极的研究,但只是在最近由于半导体元件的问世才取得显著的进步。近代保护所要求的性能不断提高,已经达到了机电式继电器能力的极限,因此,发展具有高性能和更大潜力的静态保护装置,成为迫切的需要。

本文广泛地探讨了静态保护装置的发展、设计原理、元件选择及对环境条件的估计,这些问题对生产适合于制造并具备系统保护所需要的特性与可靠性的保护装置是很重要的。为了说明本文介绍的各种方案和意见,给出了实际装置的典型例子,讨论了静态保护装置对有关设备的影响,展望了未来的发展趋势。最后对制造厂生产发展现状进行了评论,提出了进一步发展需要使用者积极参加的意见。

1. 引 言

近代半导体及其有关元件,显示了满足静态保护装置的放大与开关等基本要求的巨大可能性。过去五到十年进行的大量研究与发展工作表明:已经建立起来的保护功能和动作特性,是可以复制出来的,而且新的更有价值的保护特性也是可以达到的。在现阶段,很多静态继电器和保护装置已在生产供应,而且其他许多领域,用半导体也是行得通的。因此,静态技术给运用半导体于电力系统保护感兴趣的工程师们带来了新的意义。

所谓“静态继电保护”,就是采用一些电路和元件完成传统的机电式继电器所完成的各种保护作用和动作特性。这个概念已经研究二十年了,但是由于制造坚实而又可靠的放大和切换装置的一些重要要求,没有完全解决,因此它的实际应用推迟了。饱和电抗器(transductor)已广泛应用,但电子管只在少数情况下应用得较成功,例如电力线载波保护,只有使用电子设备才有可能。尽管早期的研究只取得局部成功,但它对近代保护的影响是很显著的,至少在英国,有很大一部分保护装置可划为静态的。

以前出版的文献,一般限于专门的理论和实验研究方面,本文根据制造厂在生产以半导体为基础的静态继电器和保护装置方面所取得的工作经验,提供进一步的补充资料。当连系到大量生产的经济性时,经验证明,静态继电器的设计、制造和应用,带来了许多实验室中所遇不到的问题。本文谈到了当代发展的实例,讨论了影响设计的各个方面,提出了新型静态继电器给予有关设备的影响,指明了将来的发展方向。

2. 静态继电器发展基础

2.1 基本考虑

电力系统的不断发展,要求改进保护装置,并且往往要求保护装置的特性更加复杂。当短路水平、线路容量以及互相连接的复杂性有所增加时,要特别强调一贯重要的可靠性。在系统的特性和负荷接近设计极限的情况下,为了保持动态稳定性,缩短动作时间是很重要的。常规的机电式继电器要满足这些要求,已经没有进一步改进的余地了,而使用新的静态继电器的经验说明,对上述要求是很好实现的,并且一些新的特性会对将来的应用发生影响。其他在制造和应用方面的利益可能被发现,因此在评价其未来的地位时,考虑所有这些因素是很重要的。

为了满足保护的各项要求,用机电式继电器使基本元件的设计合理化总是很困难。动圈式、感应杯式和吸引衔铁式继电器虽然取得了成功,但是它们的灵活性通常受到限制。相比之下,新的静态继电器是很灵活的,很适合于合理化要求,可以达到标准功能元件系列化,对制造和使用都有利。这种系列元件的基本功能归纳于第2.2节。

静态继电器的缺点是难以保存的,特别是当很多近代的继电器在进一步发展取得经验之后不可避免地被置换时是如此。目前,要得到与机电式继电器价值上的平衡有时有困难,但是直接比较对等的继电器的价值是不现实的,除非有关设备的潜在经济性都考虑在内。这在第5节中要进一步讨论。经验证明,已经制造了多年的常规继电器的价值不会显著降低了,而静态继电器最近五年来价格不断降低,而且这个趋势还要继续下去。静态继电器往往需要辅助电源,增加了费用,这是个缺点。由于投入运行的设备越来越多,而且安装是以变电所为基础来考虑,而不是以一个一个的线路考虑,因此辅助电源的重要性大为降低。或许最重要的缺点是半导体元件容易因二次回路出现的短时感应电压而损坏,这在第4.5节要详细地谈。根据大量的数据和经验,这个问题将减小到可以容许的程度。

2.2 构成保护继电器特性的功能元件

采用不同动作原理的继电器,可以得到相似的功能,这些原理和设计准则,决定着基本功能的满足程度,以及实际情况与理想情况的偏差。静态继电器可以达到很高的性能,以致与理想情况的实际偏差可以忽略不计。这种高的性能结合设计的灵活性,使它有可能满足很多保护的要求,而只用少数的功能元件。包含这一系列功能所需要的基本元件将在下节予以讨论。

2.2-1 综合环节

在静态装置中,已经完成了把许多电气量结合为单一的量,如采用综合变压器和相序过滤器,它们的性质是符合静态继电器的概念的。将来综合环节的尺寸可能减小,还可能采用新元件、新技术,其中包括有源元件。半导体电路适合于采用模拟计算技术常用的求和结。所有这些,保护装置都适用,如第4.2节所述。

2.2-2 单一输入量的继电器

这种继电器是很多保护和控制装置的基础,它可分为如下几种:

(a) 无临界值的中间继电器(有或无继电器)。

通常它的切换功率增益为 10^3 级,带有许多独立的输出(即接点)如图1a所示。这种型号的继电器一般是瞬时动作的($\leq 20\text{ms}$),但也可能带延时元件。这种继电器或者是完全不

通电，或者是一通电就大大超过它的边界条件，以保证它快速动作并具有很大的接点压力。典型例子为各种吸引衔铁式继电器，其中以电话继电器最常用。现在还可用动作更快（1~2 ms）的舌簧继电器，也可用半导体元件如可控硅。继电器的重复功能，通常由临界或测量元件的输出触发。

(b) 临界的或测量用继电器

如图1 b所示，继电器反应输入超过某一预定的临界值时动作。它往往要具备开关放大作

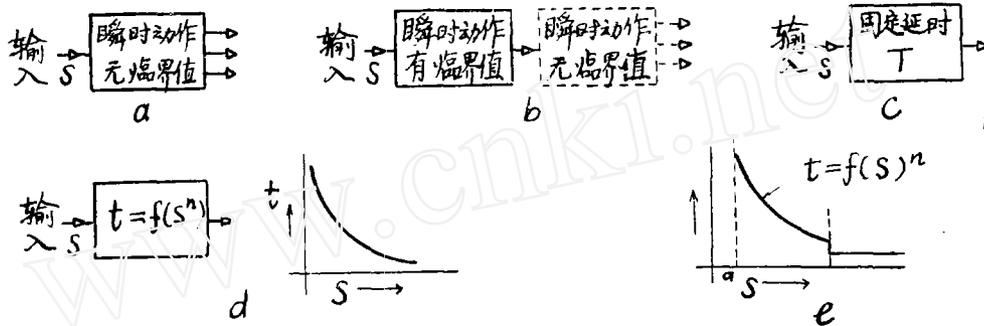


图1 单一输入量的继电器

- a. 无临界值的中间继电器
S 为零或大于边界动作值
- b. 临界的或测量用继电器
动作时 $S \geq A$ (临界值)
返回时 $S \leq KA$ ($K \leq 1$)
- c. 固定延时继电器
S 为零或大于边界动作值
- d. 延时为输入的函数的时间继电器
- e. 具有定值启动和高整定值瞬动特性的时间继电器

用，但不需要很高的放大倍数，因为还可以配置中间继电器。测量元件用在很多保护系统如过流、欠压、过压和差动保护系统中，它可以由吸引衔铁式、感应式或动圈式继电器完成测量作用。半导体电路的灵活性允许它完成测量作用，而被它驱动的电磁继电器、舌簧继电器及可控硅为无临界值的。对测量元件的要求为动作快、定值准确和返回系数高。

(c) 固定延时继电器

这种继电器的输入与输出之间有一固定的延时，如图1 c所示。该延时可能指从加输入信号到出现输出信号之间的延时，或者是从输入信号消失到输出信号复归之间的延时。输入信号为无临界值的，它有时为零，有时大大超过临界值。这种继电器可能具有开关放大和多组输出，因此它也有中间继电器的作用。此继电器往往由测量元件动作，或者在某些情况下，测量元件被结合在输入回路中。对延时继电器的要求为时间整定准确和连续通电时的可重复性。

(d) 延时为输入的函数的时间继电器

这种继电器示于图1 d，最常见的特性形式为：

$$t = f(S^n)$$

上式 n 为负值。实际的继电器（如用在过流和过负荷保护中）一般包括低整定值和高整定值的瞬时测量元件如图1e所示。

2.2-3 两个输入量的继电器

这种多输入的继电器的特定情况值得特殊考虑，因为它在实际上用得非常普遍，例如偏置继电器（biased relay）、方向继电器、距离继电器和相位比较继电器。利用各种不同原理的继电器，可以得到多种动作特性。继电器的作用通常由输入量间的关系所决定，这种关系决定着继电器动作的边界条件。继电器有两种基本形式：

(a) 大家所熟悉的偏置继电器，也叫“幅值比较器”

(b) 各种方向性或功率继电器，也叫“相位比较器”

两种比较器的理论见参考文献[1]，此处只予简单介绍。

(a) 幅值比较器

幅值比较器用符号表示于图2a。一个输入为制动量，另一输入为动作量，当两个输入量的比小于某临界值时即有输出。理想的情况是，当比较这两个输入量的幅值时，应与它们的大小和相位无关。幅值比较器的特性可用复数平面图上以原点为圆心的圆来代表，该圆即规定了动作值的边界条件。

(b) 相位比较器

相位比较器示于图2b。当两个输入量之间的相位关系在规定的限度以内时就有输出。要得到输出，必须两个输入量同时存在。理想的情况是其动作应与输入量的大小无关，而只决定于输入量间的相位关系。其特性由动作的边界条件所限定，在复数平面上为自原点所作的两条直线。

任一种比较器在输入量经过适当的混合元件（图2c）后馈入时，可以互相同于另一种比较器。使用这种等同电路表明[文献1、7]，不论用相位比较器或幅值比较器都能得到同样的特性曲线，包括相对于原点的各种位置的直线和圆。

2.2-4 多输入量的继电器

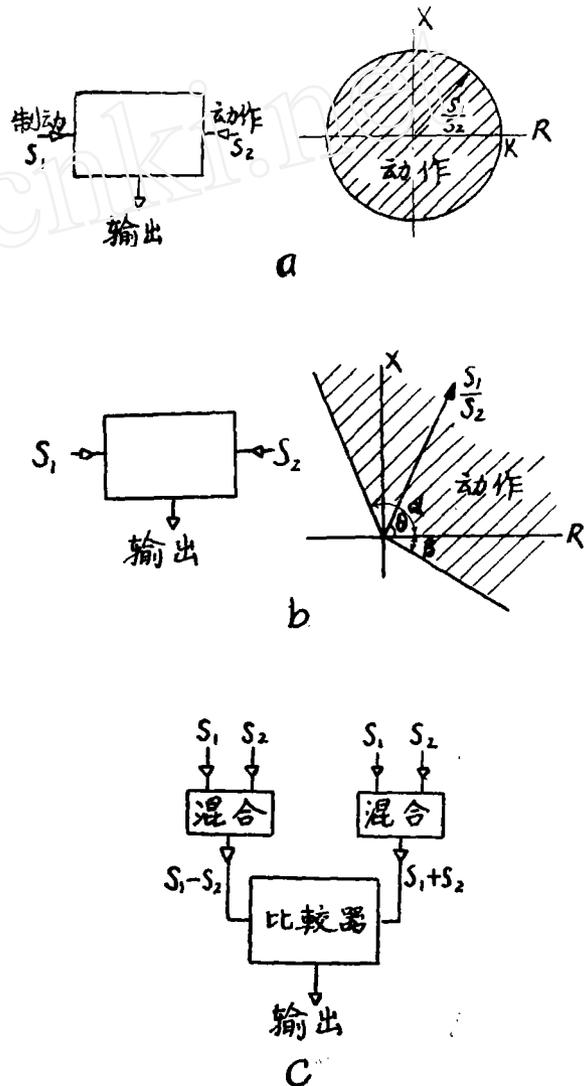


图2 两个输入量的继电器

- a. 幅值比较器，当 $|\frac{S_1}{S_2}| \leq K$ 时有输出
- b. 相位比较器，当 S_1 与 S_2 间的角 θ 在极限值 α 和 β 以内时，有输出
- c. 输入信号混合电路

输入量多于两个时,特性的复杂性增加了。采用幅值比较器,可以获得剩余的二次曲线,即椭圆、抛物线和双曲线[1、4],典型例子示于图3a。采用相位比较器,则得到非连续性的特性,其有效动作区为几条直线和圆的共同动作区[1、6],这种特性的例子示于图3b。从这些特性可以看到,幅值比较器和相位比较器的互换性不能引用到多输入量的情况。

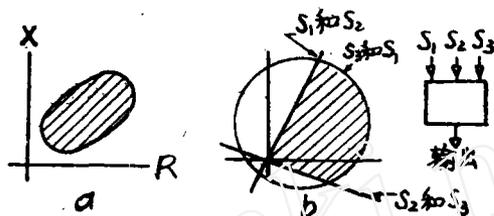


图3 多输入量的继电器

a—三个输入量的幅值比较器

b—三个输入量的相位比较器

2.3 近代半导体对继电保护要求的适应性

近代晶体管特性特别适用于上述继电器功能元件,当它与其他半导体和各种与它配合的元件的发展相结合时,促成了静态继电保护装置的实现。这一技术特点特别适合于设计具有放大与开关特性、灵敏而快速的继电器功能元件。其他的特点如设计和应用的灵活性、寿命长、体积小、结构坚实以及简单化的电源要求,都是很吸引人的。

经验表明,晶体管电路能完成第2.2节所述的全部基本功能,以及其他功能。它们不仅能够很好地完成这些功能,还可以设计成分元件,非常灵活地适应合理化组件的基本概念,这种组件互相连接起来,就能组成各种电力系统的保护装置。第3节为这种保护装置的典型发展举例。

3. 静态保护装置的实际例子

3.1 概述

采用半导体作为静态保护装置的电路的发展,必须与基本功能元件相联系。每个功能元件可能包含几个电子电路,而一个复杂的保护装置则可能包含许多不同的单元。保持每个单元电路的一致性,简化了对这种保护装置的综合评价,因此个别的和复合的特性以及基础的电子设计原理被保存下来,而不为复杂纷乱、互相连接的电路所掩盖。考虑界面(interface)的要求是设计个别单元时的一个重要方面。

大部分以电子管为基础的传统电路都有它的半导体的对等电路。许多的这种电路与在半导体应用的广阔范围内发展起来的其他电路相结合,已经用于静态保护装置。这种电路的原始形式,不是总能够设计得适合第4.5节谈到的保护装置所特有的环境条件和影响因素的,因此导致设计一些专门适用于保护装置的新的电路。如果要用静态保护装置达到总的性能和可靠性,则元件和电路的选择,必须如第4节所示以不同特性的宽广范围要求为条件。有些特性会发生矛盾因而引起设计时折中考虑。下几节中,为了说明第2.2节列举的一些最重要的功能,介绍了几种实际电路,并着重于实际完成这些功能所必需的一些特殊性能。

3.2 无临界值的切换元件实例

这种元件在保护装置中的两个主要任务是:

(a) 提供给断路器最后跳闸信号, 以及完成起动跳闸、信号与指示等辅助作用。

(b) 作为保护装置各功能元件的中间切换元件。

过去, 这两项任务采用各种机电式继电器完成。对于(a)项任务, 用机电式继电器是经济可靠的, 尤其是当需要几个独立的输出回路时是如此, 但是总的跳闸时间要 $10\sim 30\text{ms}$ 。对于完成(b)项任务, 虽然一般来说也是可靠的, 但动作时间太长, 接点性能有时也不适合。

传统的电磁式继电器与静态保护装置相结合时, 如果动作时间允许, 可以作为无临界值的切换元件。目前为了减小动作时间, 已在积极地探索用其他元件代替的可能性, 这种可能性主要有以下两方面:

(1) 采用较新的快速电磁继电器, 如舌簧继电器;

(2) 采用静态开关电路, 如晶体管或可控硅。

选择哪种方法及其影响因素, 将在第4节中详细讨论。经验表明, 舌簧继电器可靠, 而且即使在小整定倍数时也有足够快的动作速度($1\sim 2\text{ms}$), 这个速度对保护的动作时间来讲是可以忽略不计的, 因此可用于完成(b)项任务。舌簧继电器的输入回路和输出回路分开(虽不一定总是必要的), 还能带来应用的灵活性和互相连接的自由度等好处, 使交界面的问题容易解决。舌簧继电器的动作功率可能要求一具有正反馈的晶体管前置放大级, 但是由于输入和输出是分开的, 不会因此产生交界面的问题。舌簧继电器以前一直是小接点容量的, 不适于用作跳闸。如第4节所示, 现在用近代舌簧继电器可能担当起这个任务。

晶体管开关电路适合于完成(b)项功能, 并且正在这样用了。如前所述, 有时候加入一只舌簧继电器作为中间级, 只是多用了 $1\sim 2\text{ms}$ 的延时, 就可以改进特性。跳闸回路的容量一般不适于采用晶体管开关电路, 但是如果为了适应防震要求, 需要全静态的跳闸回路的话, 则在不产生交界面问题的情况下, 可采用可控硅。其他的环境问题可能由于保护装置、跳闸线圈和跳闸电池之间的互相连接线没有隔离而引起。触发回路正常地具有一定的反应时间($1\sim 2\text{ms}$)是必要的, 以防止虚假触发, 因此实际(利用可控硅的)装置的动作时间与舌簧继电器的动作时间还是相似的。可控硅的使用一般限于防震要求高的地方, 如船用设备。

3.3 临界电平检测器实例

这种保护元件的重要特点为输入量通常是工频, 而且在相对于临界值的一个很宽的范围內变化。其基本要求为准确、长期稳定、速动和返回系数可以控制。一般要求返回系数高。已经证明, 用电磁式继电器要想达到以上的要求总是困难的。采用某种形式的平滑电路是必要的, 它可由输入信号整流、滤波后提供, 或由继电器内部的机械的或磁性的平滑装置提供。然而这样一来给获得快速动作和快速返回特性带来问题。电磁继电器例如吸引衔铁式, 具有固有的触发动作, 带有坚固的突动接点, 这一特点虽然是所希望的, 但返回系数却很低。当设计与此对等的静态继电器时, 必须选择一种电路能够保存电磁继电器的优点而克服其缺点。这个电路方案示于图4, 它保存了输入信号的周期特性, 其返回系数高, 而且接点为突然动作式。这种电路可做成对输入电流中一般存在着的非周期的直流分量(Offset transient)不敏感。它也可能做成自励式的, 这是起动继电器特别希望的特性, 因为它允许相关的元件(这些元件必须有辅助电源)正常时不激励。

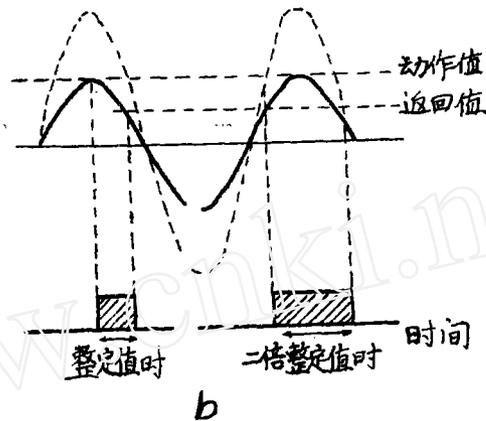
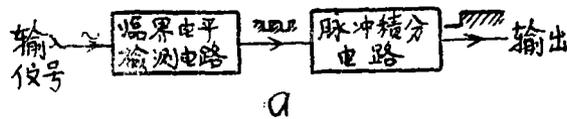
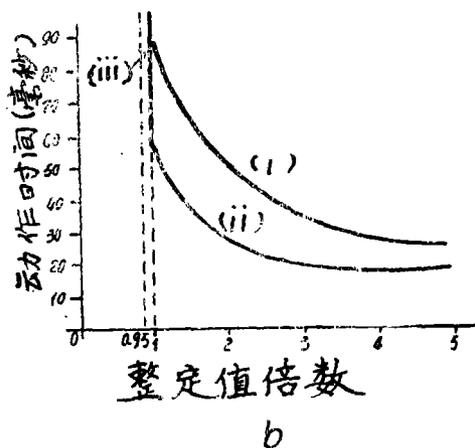
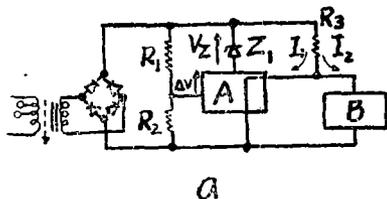


图4 高返回系数的临界电平检测器动作原理

a—基本电路

b—临界电平检测器相对于输入信号电平的动作周期

继电器使用两个基本电路示于图4a。第一个电路为临界电平检测器，它使交流或未经滤波的整流信号与一直流基准信号相比较，并设计成低返回系数的。当输入峰值低于基准值时，输出为零；当等于临界值时，有一定的输出脉冲，脉冲宽度决定于返回系数，如图4b所示半波的情况。当输入增大时，输出脉冲变宽，但在临界值时，脉冲宽度实际上超过了第二



a—电流动作的电路

A: 测量及切换电路

B: 脉冲积分电路

b—采用吸引衔铁式继电器的时限特性

(1) 非周期直流分量为最大时 ($X/R = 20$)

(2) 无非周期直流分量

(3) 非周期直流分量电流为最大的情况下瞬变接点闭合的区域

图5 采用晶体管的临界电平检测器电路

个电路的动作边界值，第二个电路为脉冲积分电路。这个基本的继电器的优点是，即使返回系数达到了100%，仍然保存了突然动作的特点。除了电平检测器中的基准信号以外，其他设计参数均为非临界值的。

以适合于电流互感器激励的形式而采用此原理的自激电路示于图5a。全波整流后未经滤波的输入信号供电给两条回路（ I_1 和 I_2 ）。在临界值以下时，测量和切换回路完全导通，因此对于所有实际效果， I_2 为零。从齐纳二极管 Z_1 导出的基准电压 V_z 实际上是直流电，处于临界输入电平下。输入回路的负荷在临界电平以下，只受 R_3 的控制，它通过 R_1R_2 供给测量和切换回路电压。当 R_1 上的电压超过 V_z 一微小电压 ΔV 时，出现临界电平。 ΔV 为切换回路动作值。切换回路动作后，即切换到高阻抗输出，使电流 I_2 流入脉冲积分电路。如果 ΔV 相对 V_z 为很小，则综合性能不是严格地决定于晶体管参数的，而且测量准确度只决定于 V_z 和电阻 R_1 、 R_2 及 R_3 的值。如有必要，可增大 ΔV ，并使之随温度而变，以补偿 V_z 的温度效应。在切换瞬间，经过 R_1 的输入根据脉冲积分回路的输入阻抗增加到相应于 R_3 的某一个值，给测量回路以正反馈，控制瞬时返回值。返回值的选择中考虑从电流互感器吸收的无功功率以及其他一些要求（例如防瞬变特性）。

简单继电器采用已经讲过的测量回路和吸引衔铁式继电器作为脉冲积分元件，其典型延时特性示于图5b。从图中可看出在相当小的整定倍数时，曲线很快接近最小时限，并且甚至在 X/R 高达20:1时仍有良好的防瞬变特性。当温度变化为 $-5^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 时，整定值保持在 $\pm 5\%$ 以内，返回系数为97%。于输入回路使用非线性电阻，并给中间变压器加静电屏蔽，可以容易地实现涌流和过负荷保护。整定值的调整可利用输入绕组的抽头，或利用分压器 R_1R_2 的电位器连续调整。采用静态电路作为脉冲积分器代替简单的输出继电器，可以达到小于10ms的快速动作时间。

一种以舌簧继电器为基础的不用晶体管的简单检测器示于图6。第一个舌簧继电器的动作准确度很重要，但是返回系数不是严格的。这种装置在整定值的2~3倍时动作时间为5~10ms。舌簧继电器式的检测器，总的返回系数约为95%。

3.4 定时限元件

静态时间元件一般利用对电容器充电时间进行控制，并且通常都需要直流电源。继电器在温度和直流电源电压于较宽的范围内变化时，应首先保持其准确度。这种继电器的优点是不连续消耗辅助电源。

这种继电器的基本电路示于图7。该电路在正常情况下不工作，而由接点 S_1 触发，然后电容器电压按指数率上升。临界电平电路由于来自分压回路 R_2R_3 的偏压而不动作，只有当电容器电压超过偏压 V 为 ΔV 时才起作用。电路的设计应使得在动作之前漏电流可以忽略

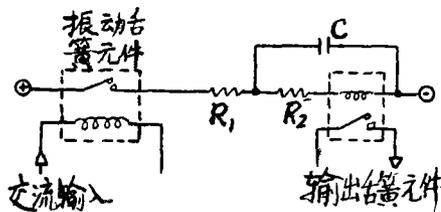


图6 采用舌簧继电器的临界电平检测器 R_1R_2C 组成积分器路

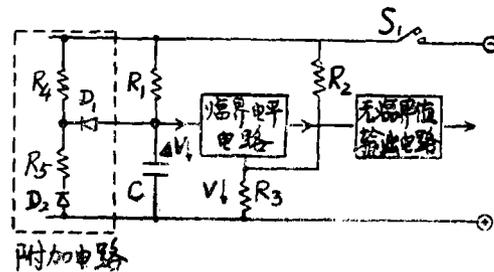


图7 定时限元件

不计,而在动作之后无寄生振荡。选择灵敏度应使得 ΔV 值对比 V 为可忽略不计,而 V 不应大于电源电压的60%。根据这个设计方案组成的延时回路可对电源的正常波动、半导体参数的改变,以及环境温度的变化进行补偿。输出回路不需要具有临界动作值,可以采用简单的电磁式或舌簧继电器。电容器的选择受第4节谈到的各种因素的影响,调整延时的可变电阻 R_1 应有良好的准确度和稳定性。

当接点 S_1 在时间回路工作期间或工作终了后打开时,临界电平电路的输入阻抗由于 R_3 小于 R_1 和电容器迅速放电而降低。如果 S_1 短时间打开(例如继电器很快再动作或者由于第4节谈到的介质吸收作用),要完全放电可能是困难的,但是可如图7加入附加电路予以克服。低电阻分压器 R_4R_5 ,当开关 S_1 闭合时,经过二极管 D_1 迅速加给电容器少量电荷,合成电压(实际约1V)压倒了电容器上的残余电压,因此通过 R_1 的可控电荷的后继时间与这个残余电压无关。二极管 D_2 用于补偿 D_1 正向温度特性的变化。

采用上述电路的延时继电器,造价经济,并且在温度和电源电压变化的宽广范围内得到准确不变的特性。临界电平检测器可以设计成具有最小的临界参数,并且对由输入浪涌产生的误动作具有固有的抵抗能力。一种定时限继电器(平时不消耗功率)的典型特性列于表1。

表1 静态定时限继电器性能

试验项目	0.1~3秒定时限继电器性能
稳定性	在标称延时范围内变化在 $\pm 0.5\%$ 以内
准确度	典型地为整定值的 $\pm 5\%$ 以内(可经过特殊校正改进)
温度	当温度在 $-5^\circ \sim +60^\circ \text{C}$ 范围内时,在各整定值上,准确度在 $\pm 3\%$ 以内
电源电压变化	当电源电压在75~130%范围内变化时延时变化在 $\pm 0.5\%$ 以内
延时范围	30:1
再循环时间	50mS,对以后的延时可得到95%的准确度

固定延时继电器可能与带临界值的或测量继电器相结合,如定时限过电流保护装置,在许多情况下,这一装置中的接点 S_1 可由半导体开关代替。

3.5 单一输入量的延时元件

在这个分类中,常见的继电器为具有最小定时限的反时限过电流继电器和接地继电器。这类继电器的重要特点是,其动作时间与输入信号值的几次乘方成反比关系。当 n [见第2.2—2(d)节]在-1至-3之间时,有多种特性满足了这一用途。实际上,理想化的输入/时间数学关系由具体的最小动作电平和规定的最小动作时间等要求所改变。在静态继电器中,选择一种电路使适合于多种反时限特性、精确的最小动作电平、最小定时限,以及必要时加上高整定值等项要求是有利的,如图1e所示。为了减小分级间隔,希望具有快速返回特性(相当于电磁继电器的小的超程),并在很多应用方面都希望有一种不连续消耗辅助电源的电路。

用于定时限元件的按指数率充电的电路是不适用于反时限特性的,静态反时限继电器一般采用恒定电流对电容器充电。由这种继电器的实验表明,以密勒(Miller)积分器为基础的电路特别适用,典型的继电器示于图8a。线性放大器正常加偏压使其输出级接近饱和。加入从电流互感器二次电流导出的输入信号使输出电压 V_0 按直线变化如图8b所示。输出波形

的斜率与初始选择的 R_1 和 C 有关，而动作时间 T 与输入电流成反比。如果线性放大器的放大系数足够高，则输出电压波形几乎与放大器的参数无关。输出电压 V_0 。形成临界电平检测电路的输入，其临界电平为可调的，以获得传统的时间倍率控制。电平检测器的输出可通过一些非临界值的装置如可控硅或简单的电磁继电器使断路器动作跳闸。

已经说过，图示继电器具有基本的反时限特性。如果电阻 R_1 用非线性的三端网络 XYZ 代替，则固有的反时限特性可以改变，而不影响其他电路的变化，特性的形式由流入 X 点的电流和流出 Y 的电流间的非线性关系所控制。甚至是很简单的只包括少数级或元件的非线性电路，在桥式整流输出不另加滤波回路的情况下，也能得到平滑的时间/电流特性。在典型延时范围内的积分电路，本身就是足够平滑的，它仅反应从 Y 流出的电流平均值。

采用上述原理制成的继电器于图示9a。 S_t 为第3.3节所述的临界电平检测器， S_1 为常开接点，避免长期消耗辅助电源。当输入电流超过整定值 S_t 时，电源电压即加上，积分电路自动地获

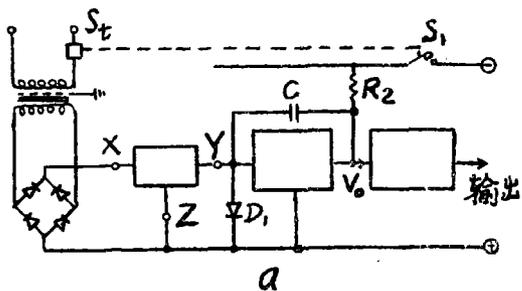


图9 独立的定时限继电器及其测量特性
a—基本电路
b—正常的BS142特性
(1) 时间倍率为1.0 (2) 时间倍率为0.1
c—极端反时限特性
(1) 时间倍率为1.0 (2) 时间倍率为0.1

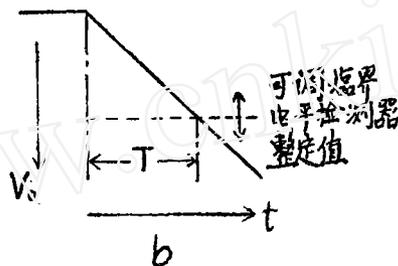
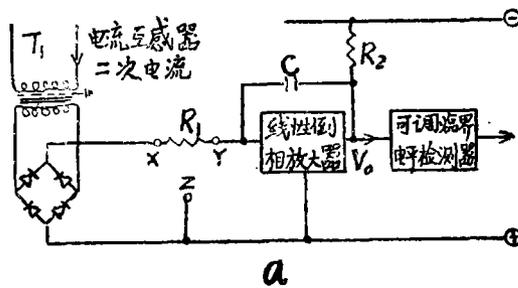
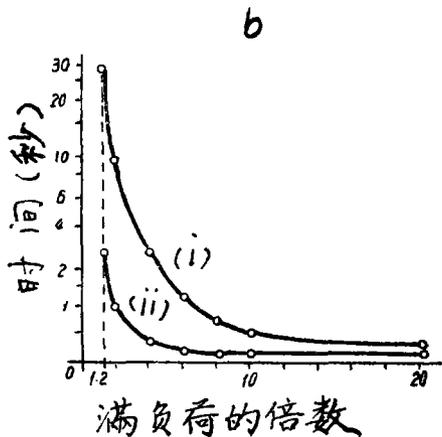
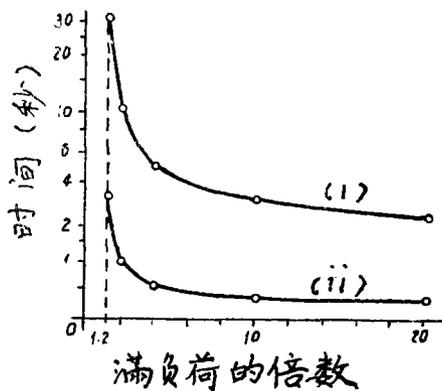


图8 反时限电路的动作原理



得必要的偏压, 延时作用即按前述程序进行。输入电流停止时, S_1 打开, 电容器经过 R_2 、 D_1 (正常不导通) 及接在电源上的所有其他回路而放电。为了克服电容器上残余电荷的影响, 可使用如第3.3节所述的预充电电路, 并且可能选择得获致快速返回特性。第二个临界电平检测器整定值高, 用了它, 可于输入值高时得到瞬时动作。

上述型式的静态继电器, 加上一套完善的调整装置, 满足了图1e的各项要求。测量出的继电器的时间/电流特性示于图9b及c, 分别符合BS142有限反时限及极端反时限的标准规定。为了满足特殊要求下的其他时间/电流特性, 已经发展了非线性三端网络。

3.6 比较器实例

对于第2节及其他文献中〔1、7〕谈到的具有两个输入量的一般情况, 幅值比较器和相位比较器的基本关系推动了对这两种型式的静态装置的研究。晶体管的良好开关特性, 特别适用于比较相角。因此在1958年的一种最早的距离保护装置中即进行了研制静态相位比较器的工作。静态幅值比较器自然是从众所周知的整流桥电路发展起来的〔1、7〕, 它所用的比较回路已经是静态的了, 只不过输出积分器为电磁式的, 例如动圈式继电器。

早期的经验表明, 比较工频方块波的相位在相位比较载波保护中使用了多年, 其性能优于使用窄脉冲。比较工频方块波的方法能够构成静态相位比较器(图10a), 它包括一个比较回路和一个输出积分器。积分器的设计决定着输出出现时两输入量间的临界角。最近已经研究过检测此一临界角的另一种方法〔5、6〕, 它是以比较回路的输出方块波同长度和时间位置可以控制的参考脉冲进行比较的。

这种比较回路可以是一个简单的工作于开关状态的晶体管电路〔3〕, 这和早年应用快速电磁继电器于这个原理的想法是相似的〔8〕。

另一方法为采用无放大的元件, 如二极管环形调制器(ring-modulator)。采用晶体管开关电路, 由比较回路产生的输出电压波形, 在所有实际的工作电平上, 实质上都可以做成矩形的, 而且全部比较器的反应时间是可以预先决定的, 它只决定于输出积分器的设计特性。静态相位比较器的典型特性示于图10b, 图中还指出比较器的临界角由积分器的整定角控制。图10c表示时间特性, 它可以准确地预计, 它的相当高的反应速度即使在边缘的动作区内也能达到。

最简单的静态幅值比较器, 采用整流桥电路, 加上一个静态积分电路以代替动圈式继电器。这种比较器过去曾经试过, 但是以前采用整流桥的多次经验表明, 由于整流桥产生的反射电压引起两个输入回路间的相互作用, 特别是在低信号电平范围内成为一个设计问题。进

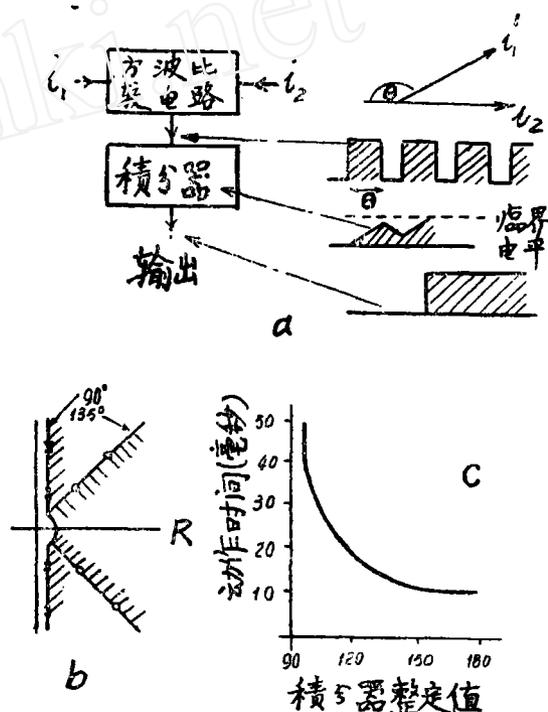


图10 比较方块波的相位比较器

a—比较器及积分器

b—基本特性, 角度为积分器整定值

c—延时特性

一步的研究表明,用三极管代替二极管是有利的,如图11a所示。这种比较器的性能决定于几个晶体管的放大系数的匹配,因此这种电路应加上很强的负反馈。所以实际的比较器为将晶体管接成共基极电路。由于输入电路之间分隔开了,同时比较回路中的阻抗值与输入回路的阻抗值无关,因此这种比较器的特性得到改进。对这种比较器的波形进行的分析表明,与相位比较器所产生的波形很相似,因此尽管两种比较器的工作原理完全不同,但可采用同样的积分器。特性可由积分器的整定值控制,如图11b所示。反应时间可由分析方块波和积分器的有关特性预先得知,如图11c所示。如果相位比较器在其输入信号进行必要的混合后获得圆特性,则反应时间可表示为相同的。

两个比较器的各种静态电路,当与一输出积分器相结合并以推挽方式工作时,它们基本上是很相似的。但是根据使用这两种比较器的实践经验表明,相位比较器较容易符合第

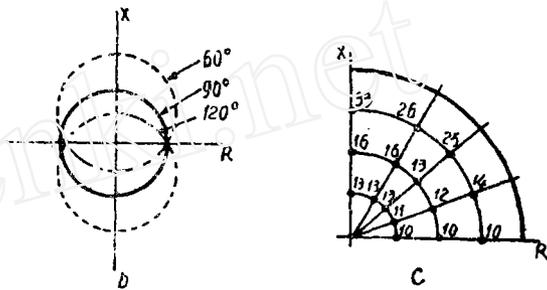
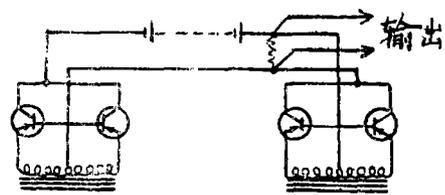


图11 基本的幅值比较器

- a—晶体管桥式电路
- b—基本特性,角度为积分器整定值
- c—复数平面内的时间特性,数字表示以毫秒计的时间值

4节所述电路原理和对元件的选择。而相位比较器具有获得第2.2—4节讨论的不连续特性的可能性,则是人们乐于采用它的又一原因。

如前所述,基本的比较器可能组成简单保护装置组件,例如差动保护装置中的偏移继电器,或作为第3.3及3.5节中过流保护的方向元件。下一节将叙述距离保护装置的典型应用。

3.7 保护装置实例

保护装置要求把各种复杂程度不同的基本元件互相连接起来。距离保护装置(特别是切换型的)是最复杂的一种装置,可作为第3节中所述很多实际的元件互相连接的一个极为有用的例子。

为了揭示静态装置在电路技术和有关性能两方面的全部潜力所进行的实验室的研究,已经指向发展一种高性能由启动元件选择的切换型距离保护装置。这项工作已经产生出一个如图12所示的实际保护装置,装置遵循传统的方法,按照启动继电器动作来选择加于单个测量元件的电压和电流信号。启动继电器也使辅助器源接入晶体管电路,以避免连续耗电。时间元件也由启动继电器

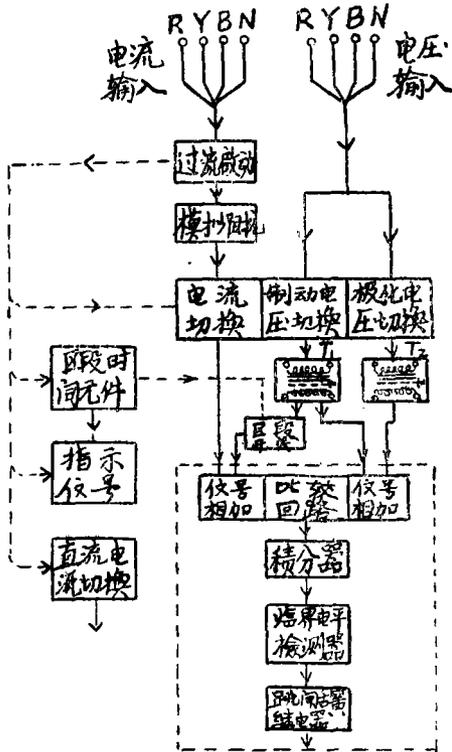


图12 切换型距离保护装置

器动作，它分阶段地增加阻抗整定值。如果选用极化的姆欧测量特性，则启动元件起初限于使用过流元件。

启动继电器根据第3.3节的原则，采用舌簧继电器如图5所示。选择这种原则是特别重要的，因为可以得到动作速度快（典型的为5ms，但随故障发生在一周波内的哪一点上而变化），返回系数高（95%），输入输出分开，不连续耗电等多方面的好处。当装有欠电压启动继电器时，与过电流启动继电器一起工作，并采用舌簧继电器按相同的原則设计。

如图12所示，启动继电器操作制动极化回路和电流切换回路，并触发静态时间元件和辅助电源开关回路。完成以上全部动作是很快的，采用舌簧继电器只需2~3ms，除了对电源大小起主要决定作用的舌簧线圈的无功功率外，不会由于动作的无功功率或隔离作用产生问题。参考第4节对舌簧继电器进行试验的结果，对所有转换接点和跳闸继电器的常开接点选择钨接点，额定电压为1KV；而对切换小电流用的常开接点则采用部分扩散的金接点。

变压器 T_1 和 T_2 ，以及电流回路中的双绕组模拟阻抗的绝缘应能承受5KV冲击电压（第4.5节），并具有接地的静电屏蔽。相位比较器采用两个具有第4节所述的综合电阻器的稳定放大器，使输入电压信号和电流信号相加。在综合电阻器网络中，使制动回路的非线性补偿和极化信号的相移网络相结合。相位比较器为方块波比较型，围绕晶体管重合电路进行设计，积分电路与比较电路按照第3.6节指出的原则紧密配合成为一体，以获得快速动作。

临界电平检测器为一常规的双晶体管开关放大器，临界值根据第4节讨论的原则设计。当积分器的输出达到开关放大器的触发值时，跳闸信号即通过第4.2节所述舌簧继电器跳闸回路发出。积分器所具有的固有动态动作时间为15ms，而用于跳闸的舌簧继电器动作时间约为1ms。

利用这些技术成就，保护装置的总动作时间，在其大部分工作范围内保持在25ms内。这个时间的大部分，有用地花费在比较回路内，而且这类保护装置，不管是在静态或动态故障情况下，都达到了特别低的动作时间而不牺牲测量准确度。第一段的典型综合特性示于图13，这是从一次X/R比为10~15的试验台[9]上测得的。综合动作时间在一个很大的范围内是快的，且可以看出测量的准确度不受直流非周期故障电流(offset fault current)的影响。第二、三段的测量准确度曲线与第一段所示曲线相同，只是阻抗整定倍数的刻度改变了。两段的时间元件均为静态的，如第3.4节所讨论的形式。利用充油的电位器对阻抗和时限进行连续的调整和整定。（第4节）

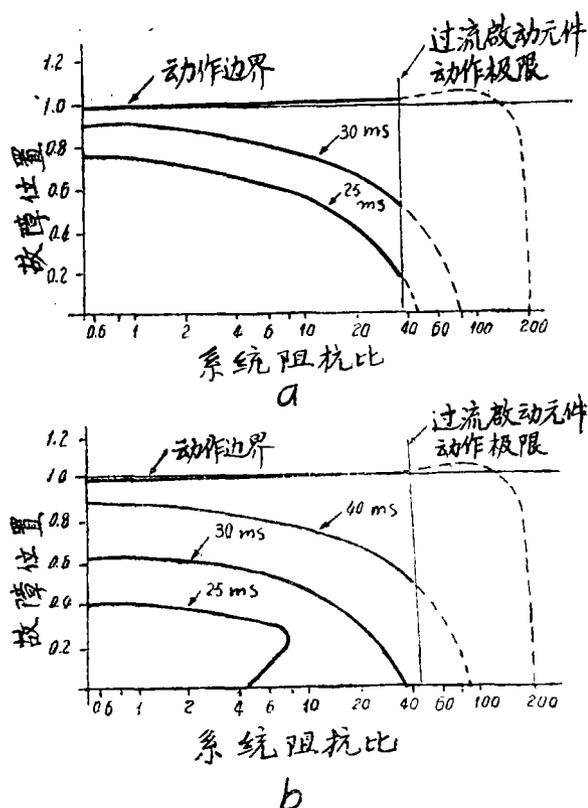


图13 RY相短路时测量元件第一段特性
a—直流非周期分量为零时切换
b—直流非周期分量最大时切换

整个装置由一包括密封的Ni—cd蓄电池及静态电子充电回路组成的完整的电源装置供电。该电源装置可由电压互感器或其他外部交流电源供电。表2列举了本保护装置采用过流启动继电器的综合性能。

还发展了其他的保护装置，包括用于启动的静态阻抗继电器在内，它们都是按相同的比较器电路设计的，其直流功率的连续消耗已经降低。

表2 静态切换式距离保护装置产品性能

项 目	性 能
*阻抗调整	
第一段(1A继电器)	1.6~48Ω
第二段	第一段的1~15倍
第三段	第一段的1~15倍
*零序补偿调整(Z_0/Z_1)	2.2~4.3
特性阻抗比	69:1
*时限调整	
第二段	0.1~3.0秒
第三段	0.2~6.0秒
过流启动元件	
*调整范围	50~300%
返回系数	95%
最大灵敏角	45° 60° 75°
动作时间	见图13
功率消耗	
a 电流互感器	1.6~24Ω整定值时为1Ω以内
b 电压互感器	每相1.5伏安
电源装置	
a 负荷	从电压互感器或(附加于电压互感器的)外部交流电源供电时的典型值为1.8伏安
b 备用	从全充电状态起约6个月
绝 缘	2KV _{r.m.s.} 历时1分钟 电压互感器和电流互感器端子之间 电压、电流互感器端子与地之间 交流电源端子与地之间 5KV, 1/50μs冲击电压试验 跨接在电压互感器端子和电流互感器端子上 电压互感器与电流互感器端子与地之间 跨接于交流电源端子上
指示器	手动复归, 机电式信号指示器

*连续可调

4. 电路及元件的利用

4.1 概述

第2节所述保护功能的分类和第3节介绍的实际设计方案,在生产具有规定的技术性能和高度可靠性的静态保护装置时都是很重要的因素。所用电路的功能规格和元件的特性也是评价保护装置的重要根据。电路和元件在评价保护装置的特性、可靠性和生产潜力时是相互牵连的,而且在所有情况下应将它们严格地结合起来研究。电子电路技术所固有的多样性,在初始发展阶段提供了对电路的广泛选择,而只有经过透彻的评价之后,才能认识到许多新奇和复杂的电路的缺陷。

已经建立起来的电子电路设计和元件选择的原則,一般均适用于保护装置的发展,但是必须弄清保护装置所特有的环境因素,这放在第4.5节中讨论。基于本节所讨论的设计途径,经验表明,一个保护装置发展工作小组应当完全指向现代电路技术领域和电力系统保护装置的实践方面,以保证设计的充分配合。

4.2 电路的评价

静态保护装置的各个元件不需要什么新奇的电路,一般较简单的电路就适用。这种电路不大复杂,工作时不用特别调整,或对元件初始误差进行补偿,通常经过分析即能解释清楚,它对温度和电源的变化是很稳定的。这种电路制造时装配和试验都很方便,而且通常具有很高的长期稳定性和可靠性。大多数保护装置元件的特性是以检测幅值或相角的不连续性来表示的,因此可以自由地采用多种静态电子开关电路。线性放大器只在少数情况必须采用,它们的设计参数很复杂,应该小心地选择,并结合总的接线图来考虑。

电路的选择不应当引起元件的选择产生不必要的问题。对大量半导体的初始参数进行精确的控制,在经济上是不允许的。由于温度和老化,容许参数有一定误差变化,电路必须适应这些要求。特殊的温度补偿元件或逐件调整,牵涉到试验时耗费大,而且通常在寿命后期是不明确的。采用电容器的电路也必须接受电容量围绕标称值的宽广的初期分散性,延时电路的电容器必须具有第4.3节讨论的特殊特性。

设计得好的电路,例如具有各种负反馈措施的线性放大器和开关放大器,终于是依靠电阻元件得到综合的稳定性和综合性能。因此一种较好的电路,一方面绝对依靠有源元件的完整性,同时它们的静态和动态性能,在很大程度上可以根据无源元件的参数来决定。经验表明,当选择一种电路,其放大系数要求不严格,只要不降到预定值以下时,有源元件的参数通常可降至次要的地位。

在第8节所给的例子中,保护功能的完成所取得的最后成功,主要依靠对上述原则的观察。图5和图7临界电平电路的要求,通过采用第3.3节所述的工作原理,实际上变成相同,两个电路都可由采用高增益的开关放大器电路而满足要求。临界开关电平由电阻分压器或齐纳二极管所导出的参考电压规定,而使推动放大器所要求的输入电压 ΔV 与此参考电压相比是很小的。电压 ΔV 包含两个电压分量,一个是输入晶体管的内部电压降(toe voltage),另一个是推动放大器使它达到所要求的输出电平时所必需的电压。第一个电压分量是选定的晶体管所固有的,对于硅晶体管,其典型值为500~600mV。第二个电压分量可由于放大器的增益设计为最小时而不显著。参考电压至少要比 ΔV 大

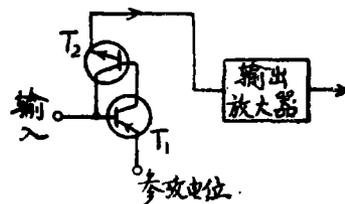


图14 临界电平检测器的开关放大器

一个数量级,因此即使在很宽的温度范围内也与 ΔV 无关。如有必要,可根据第3节介绍的方法进行温度补偿。图14的晶体管电路已用于图5和图7的电路。互补的硅晶体管 T_1 和 T_2 组成正反馈放大器,其特性类似可控硅,但只需要很小的输入电流即可触发。这种电路的“封入”(seal-in)特性,对延时电路有用,特别是符合交流操作的临界电平检测器的工作原理。单晶体管输出放大器通常即可满足延时电路的要求,不过临界电平检测继电器必须有倒相器。无临界参数的元件,达到了经济性的要求,而且这种电路非常适合于生产。

由负反馈稳定的线性放大器的用途由图8的Miller积分电路可以说明。如果按照所要求的时限来规定最小增益,则可采用任何一种线性倒相放大器。采用互补晶体管放大器的好处是容易使输入只有一个内部压降。起始电容误差可调整输入网络XYZ中的电阻得到补偿。

这种积分电路在快速保护装置中有许多用途,例如作为平滑和检测工频信号的手段时,具有最小的动作延时。它们可用于图5的脉冲积分电路,还特别适用于距离保护的比较器,如图10,以及用于相位比较载波保护装置的相位检测器。由电阻负反馈稳定的放大器可用于工频电量的矢量求和电路如图15所示。

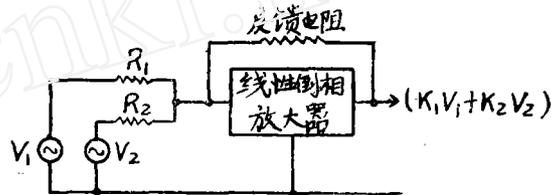


图15 利用稳定放大器的工频信号矢量求和电路

K_1 及 K_2 为刻度系数

从距离保护的电流和电压互感器输出导出的信号 V_1 , V_2 , 经过电阻 R_1 和 R_2 加于放大器的低阻抗输入回路,这是模拟计算方面尽人皆知的技术。输出是两输入量的矢量和,根据稳定的放大系数和 R_1 , R_2 分度。这种技术也适用于直流,还可扩大到多输入量的情况。

除了所讨论的一次电路元件外,采用各种门电路的二次电路元件,对于电路的互相连接和配合都是有用的。计数电路和闭锁电路很好地建立起来了,它的用处是代替传统的辅助继电器。晶体管重合门电路作为距离保护装置的相位比较器是理想的,而且可以进一步发展以获得极高的性能。

4.3 元件选择

所有元件的选择,不管是有源元件还是无源元件,都首先要考虑可靠性和寿命的要求。当今由专业厂供应的元件,由于在其他领域里应用时认识到上述要求的必要性,因此他们的产品,特别是那些有使用说明书(Service Specifications)的元件,一般都能满意地应用于静态保护装置。从第4.2节对电路的评价中清楚地知道,只有几种元件要求精密和长期稳定。在这一类里边固定电阻占大部分,最近在金属氧化电阻和金属膜电阻方面的发展,能够满足这些要求,而且具备必要的可靠性。线绕固定电阻,特别是大功率的,在保护装置中使用了多年,但可靠性不是总能达到很高的,容易发生开路现象。将所有的电阻,特别是薄膜电阻进行密封看来是重要的,这样它的可靠性可与炭质合成电阻所达到的可靠性相比美。

齐纳二极管在决定某些工作参数时,通常要求是严格的,需要从某一范围的数值中选择,其初始误差要适应于特定的用途。它们在小电流区域内的特性没有很好地规定,因此建议采用一极化电流,这在自励电路中特别重要,目的是避免在邻近故障整定值时通过小电流区域而产生漂移(transition)。温度系数可为负或正,决定于齐纳二极管的电压,而在6V左右时实际上是零。

较早是在静态继电器上进行的工作,首先是使用锗晶体管,以后使用合金结硅管。用硅管

在设计上的自由度是显而易见的, 极低的漏泄电流的优点只是被集电极电流小时的低放大系数和(在某种程度上)其相当高的内部压降所抵消。现在出现的平面晶体管的广阔范围特别适用于保护电路的设计, 另外的优点是一些半导体元件被装入一个密封壳内。当电子电路按以前各节指出的方式应用于保护装置, 经过合理化设计后, 则进一步的发展可能容许采取全集成电路的技术为有利。对危险的和不危险的元件进行观察特别重要。半导体二极管是大量使用的, 目前硅管系列符合大部分要求。在有很高的冲击电压的地方, 雪崩二极管特别有用。各种二极管必须密封得很完整。

静态保护装置使用较少量的电容器, 电容值较小的用在高频设备上。即使是在最严格的应用场合, 所设计的电路也应能容许电容值的初始误差为 $\pm 20\%$ 一級。对于一些特殊特性的要求已经叙述过了。这些特性中有几种只是由制造者草草规定, 需要专门讨论一下。环境温度高时漏泄电流的行为, 长期不通电所引起的介质变化, 以及与延时准确度有关的介质吸收作用等都是特别感兴趣的问题。实验室试验表明, 近代塑料膜电容器体积小, 而且满足了静态延时电路的严格要求, 在长期(6个月)不通电后初始工作时的延时误差小于1%。金属化纸介电容器也能达到同样的效能, 但其使用受温度升高时漏泄电流太大的限制。对比起来, 大多数电解电容器有明显的介质变化, 即使充电电阻很小, 其初始延时误差仍为+10%, 工作十次后降到+1%。充电电阻较大时, 所测得的初始误差为+30%。第3节所述介质吸收作用, 在电解电容器中也很显著。这可由简单的试验说明, 将电容器充电到10V, 短路0.1秒, 在短路撤去后测得最高电压。电解电容器的电压高达0.4V, 而塑料膜电容器和金属化纸介电容器分别为0.02V和0.06V。当短路时间增加到1秒时, 上述电压仅为一半左右。这种作用影响到各种时间继电器的设计。

静态保护的调整一如传统的方法, 利用抽头绕组、抽头电阻串成或电位器。用电位器往往很容易地实现静态保护的连续调整, 但使用电位器必须根据其作用清楚地证明是必要的, 因为这样使用时要估计电位器的可靠性特别困难。旋转部分和电阻轨道之间电接触的损坏会由于保护装置不经常调整而加剧。高质量的线绕电位器根据目前有限的经验证明是满意的, 充油式的适用于最艰难的条件。由于不经常动作, 避免了封口过度磨损, 但只有定期检查漏油情况, 经过一段长的时间, 进一步取得经验后才能保证可靠性。对最新引进的密封炭迹电位器的初步试验指出, 它适用于低功率, 特别是具有低电压的滑动接点。

4.4 舌簧继电器及可控硅

近代舌簧继电器严格地说不能分为静态一类, 但它非常适用于半导体电路, 因此在这里自然也要予以考虑。舌簧继电器在担任小电流切换和断路器跳闸等工作方面的一些特性, 已在3.2及3.7节谈到, 表明了它们在整个保护装置中的配合作用。

对于保护装置中的小电流切换接点, 其正常工作的估计, 以两个一常开接点或转换接点而言, 即使是切换小的电容性负荷, 接点材料也应选用强力的。经验表明, 在这种情况下有些金接点可能焊住。早期使用转换型舌簧继电器的经验表明, 常闭接点如果长期不工作容易粘住, 这个问题现已大大克服了。扩散金接点和像钨一类比较硬的材料都适用于此。钨的接触电阻较大, 可能影响它的使用。但是值得注意的是在这种接点上所进行的试验表明, 它在长期的工作中, 接触电阻会逐渐减小而不是增大。

如果跳闸回路的功率因数和额定值都规定下来了, 则舌簧继电器可以完成断路器跳闸的任务。图16a表明, 使用一常开的钨舌簧开关, 在开断的接点上有 $1\text{KV}_r, \text{m.s.}$ 的额定电压时,

所得到的模拟跳闸电流的波形。样品经受了上千次的动作，接触电阻没有显著增大，且表面未见损坏。上面的试验，使用了一静态电路驱动舌簧线圈如图16b所示，因此限制了舌簧的抖动为其固有值，而舌簧的固有抖动规定了它的接触能力。被试舌簧的抖动时间约 $300\mu\text{s}$ 。为了防止由于保护复归，主舌簧接点将电流断开，加上一个加强的舌簧接点。这一预防措施甚至对常规的跳闸回路也可能得到保证，而采用快速复归的静态保护和舌簧继电器尤其合理。位于加强舌簧继电器上的单方向的小球，于断路器辅助触头使直流欲断欲续引起强烈电弧时，保护它的接点。加强接点还提高了继电器的最大直流容量。所引用的试验结果是不带加强接点的。采用在同一线圈中装入两个舌簧管的并联电路，大大提高了接通电流的能力。

把用于保护装置的舌簧继电器按机械的颠簸和振动分为危险的或不危险的两类是有用的。不危险类包括在伴随严重颠簸，接点瞬时闭合但不会引起直接跳闸的那些情况，因为这种接点带动几个中间级，例如定时限元件或阻抗测量元件。危险类的最明显的例子为跳闸接点，一种具有防震特性、对称结构的舌簧继电器适用于此处，现在已有很多种一常开式的接点。

广泛用于危险用途的舌簧管经受了各种颠簸和振动的试验。舌簧谐振频率的典型值约为 900c/s ，它们符合保护装置连续振动的试验要求，实际上不反应其它的频率。振动试验结果在一定程度上受安装方法的影响，但是所有结果比常规继电器为好。模拟颠簸试验结果决定于颠簸的施加方向，但是即使颠簸横向地加于接触片的运动方向，用输入灵敏度为 $10\mu\text{s}$ 的“接点闭合检测器”（Contact-Closure detector）来量，在加速度超过 100g 的情况下，也未发现接点瞬时的闭合。这一试验是在舌簧管牢固地夹紧于线性颠簸模拟机的台面上进行。因为安装方法很重要，模拟颠簸试验会引起错误，所以必须在完整的装置或分组合上联系起来进行试验。关于非对称结构的舌簧管，尚未得到试验结果。

舌簧管有起动误差小的（ $\pm 5\%$ ），适用于图6例子中较严格的要求。在这种场合建议采用磁屏蔽，特别是当一组舌簧继电器必须紧密地装在一起时。当使用小于 38S.W.g. 线径的线圈时，线圈要用环氧树脂封装。

舌簧继电器在一些工业和船舶应用中不得用于跳闸一类严格要求的工作，尤其是当靠近谐振频率的持续振动或很大的颠簸的场合。在这种情况下，可控硅实际上代替了它，但它有第3.2节所讨论过的一些根本缺陷。实验室的工作现在已经达到下述阶段，即在跳闸电源的不同位置接上一些可控硅电路，已经经过现场试验。试验电路主要部分的典型例子示于图17，图中还包括特殊的记录和计数电路，以记录由于跳闸电源接线上的冲击波引起的动作

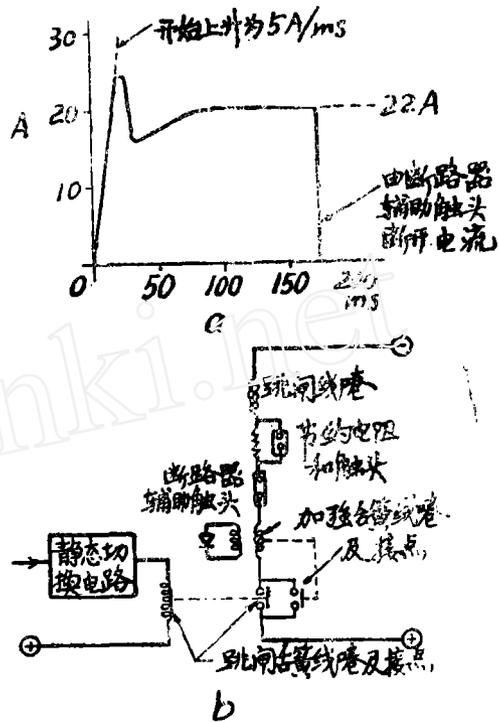


图16 采用舌簧继电器的跳闸电路

a. 模拟跳闸线圈电流波形

b. 跳闸回路接线图

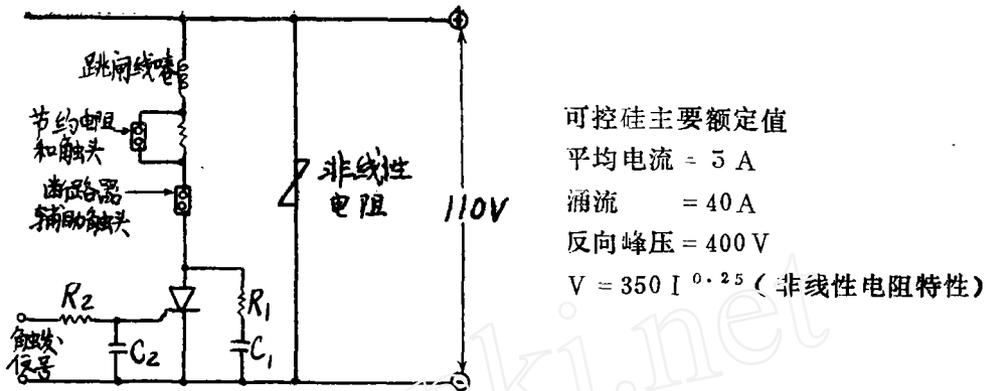


图17 可控硅触发电路

次数。非线性 (Metrosil) 电阻器和电容器 C_1 用来防止可控硅上出现的过大的冲击波。电容器除了使冲击波减幅外, 还限制电压上升率, 电压上升率是可控硅误触发的一个第二位的因素。小电阻 R_1 于动作时限制电容放电电流。控制极上连接的滤波电路的电容器 C_2 紧接可控硅, 以减小控制极的起动电压。如图所示的电路已试验了六个月, 没有发生过误动作。实验室对可控硅的工作特性进行的寿命试验已在多种跳闸线圈中获得成功。进一步的现场试验, 现在将在不接非线性电阻器的情况下继续进行。

跳闸电源与保护装置辅助电源间需要隔离的普通要求, 构成了设计上的困难问题, 现在正采用脉冲变压器触发控制极予以解决。

4.5 环境因素

4.5.1 概述

有关保护装置的特殊环境条件多年来已被公认, 最近的国家标准和国际标准对其中最重要的条款作了说明。静态保护装置应遵守这个标准的应用方面的条款, 但是有的条款毕竟需要修订和扩充, 这主要是根据过去使用机电式保护装置的经验来进行。静态保护装置的设计安装已经脱离了传统的继电器盘和其可控制的环境, 因此对它们必须有特殊的标准。这个标准特别要适用于国外使用的温度和湿度的极限。

随着很多电子元件的引进, 有必要参考保护装置以外的标准, 而弱电工程 (light-engineering) 导则及工作标准形成评价元件的基础。必须注意评价这个标准与保护有关部分的正确性, 如有些试验标准, 特别是那些在极端条件下, 机械和电气的持久试验, 只是部分的适用。新元件的飞快发展造成有些标准过时了, 而采取当新元件出现时, 进行实验室试验的对策, 则在它们接受标准较为广泛的要求以前, 往往可以先在保护装置中建立它们的适用性。

为了补充保护装置制造厂模拟保护装置运行条件所进行的实验室的主要试验项目, 新的静态保护装置的性能必须在投入工作和相继运行期间小心观察, 发现所有的环境因素, 特别是要发现那些不能准确预见的环境因素。与此同时, 由电力系统本身进行对环境因素的研究也是同等重要的, 因为目前电力系统本身虽然没有什么重大的改变, 但是新的静态保护装置对干扰信号 (Stimuli) 很敏感, 而传统的保护装置则对此容易耐受住。

到目前为止, 这项工作的每个迹象表明, 倘若设计时考虑了全部环境因素的话, 静态装

置的固有可靠性是很高的。保护装置最难闯过的大概是装置投入运行和用户在收到的第一台装置上进行试验这一关，这时试验人员又还未熟悉这种新技术。下几节将讨论一些特殊的环境因素。

4.5.2 颠簸和振动

运输时的颠簸和振动比正常条件下使用时总是严重得多。保护装置耐颠簸的设计是考虑运输时有合理的包装，而用户在搬移未包装的装置时必须经常注意。因此往盘上安装时，即使遇到很小的颠簸也可能是很严重的。

使用在静态保护装置中的大部分新的元件，包括舌簧继电器在内，质量都很轻，而其安装所固有的弹性使它们对于十分严重的颠簸和振动都不敏感。因此全静态的保护装置，只要其有关的元件如变压器及电抗器均安装牢固，它是经得起严重的搬移颠簸的。当配合有传统的元件如常规的机电式信号指示器和继电器时，这些元件限制所要求的耐受颠簸值的极限，特别是对于使用时由于非机械损坏所引起的不正确动作，虽然当它们由静态元件控制时，机械性能有所改进。

颠簸和振动试验很难与工作条件相符，但是，对于特定的用途，如果运用工程判断和经验，试验会是满意的。船舶和其他特殊的用途合理地要求很严格的试验，这种试验只有全静态的装置才能满足，从这类装置的发展和现场经验中，在初始阶段就会获得最相关结果。单独的研究表明，密封元件在浇灌树脂时会受到很大的压力，而且其耐颠簸性由于树脂有传递颠簸的特性会降低。预先浸入具有容积弹性的硅化（Silastomer）橡胶的办法已用来减小上述两个问题。

4.5.3 温度和湿度

和颠簸、振动的情况一样，在安装之前的运输和贮存期间，可能遇到极端的温度和湿度。选择第4.2与4.3节所讨论的元件和电路，静态继电器可以设计得在环境温度变化很大的范围内保持其性能。特别是采用硅半导体时，在从低于 0°C 到至少是 60°C 的范围以内，可使装置的性能只有小量变化。保护装置的最高设计温度实质上往往是最高环境温度，除了在一些连续通电的装置中，装置本身发出的热量很大这种情况之外。显然，高温时元件的损坏会加速，因此建议连续工作的装置的设计应大大低于最高容许温度。有些情况下，为了减少潮湿的影响，产生一定的可以控制的内部热量是有利的。

潮湿的损坏作用在静态继电器中和在机电式继电器中同样严重，事实上可能更厉害些。即使是小量的潮湿侵入电容器、电阻器或半导体，也是一种隐患，因此需要高质量的密封。用于有临界要求场合的金属氧化物电阻也对潮湿敏感，需要高质量的密封或涂覆。防止潮湿侵入的重要性吸引了对采用全密封的兴趣，如采用树脂浇注或涂以类似材料，但是除非生产中小心控制浇注过程，潮气还是会藏在里面，因此主要是从机械方面考虑而不作为个别元件的高质量密封的措施。如果静态装置变换新的地点，工作环境的极限温度和湿度一般地变高了，则无疑地全密封对此有利。

4.5.4 瞬变浪涌和干扰

保护装置要求工作于很宽的输入信号的范围，这意味着元件本身要有很高的耐受瞬变的能力。在这方面，静态保护装置与电磁式保护装置是类似的。然而静态保护装置的灵敏度远大于以前的装置，因此这样宽的工作范围，其影响会更加强化。

保护装置的环境特别易受各种浪涌的干扰，必须在电路设计和元件选择方面进行估算。

这种浪涌不是新的，电磁装置的绝缘已经能适应。尽人皆知，半导体可能由于几个微秒的很高的反向电压浪涌而永久性损坏，因此它需要比电磁继电器充分地考虑电压浪涌问题。由于静电耦合、电磁感应或开关操作都可能产生过电压，最重要的是那些从开关柜经过电流和电压接线穿透到静态保护装置的过电压。实验室的试验表明，快速的电压浪涌会以各种方式通过看起来是绝缘部分之间的杂散电容进入静态装置，因此它会侵入易受过电压损坏的元件。在发展期间，模拟浪涌的这种性质是重要的。但是应该看到，实际上综合效果是与有关设备如电压、电流互感器的特性及其接地的状况有关的。

由电压互感器和电流互感器传送来的浪涌，一般是最繁重的，它们可以是横向传播的或是纵向传播的。认识这两种传播方式，对于研究防止浪涌损坏的方法是个重要组成部分。当保护装置的互感器接近继电器，则地移位（earth shift）减小，纵向或共态浪涌（Common-mode surge）可能没有横向的严重。当如果是在高压变电所，分隔有相当距离的场所，则共态浪涌占优势，而且会由于在保护装置互感器处接地条件不好而加剧。

套管式电流互感器外壳屏蔽接地看来不会构成严重的共态浪涌问题。横向浪涌的作用是不显著的，因为与电流回路相连系的各元件必须耐受很高的过渡电流。电压互感器大概是高的电压浪涌最可能的来源，因为高低压端子之间的电容耦合会直接传递共态浪涌。横向浪涌是危险的，因为电压回路通常不要求满足超过额定值的电压。在个别情况下，除非是低压电容器的接地十分有效，电容式电压互感器会表现出严重的共态浪涌问题。接地条件不好时，接地网与高压端子间的电容直接耦合会引起几千伏的电压浪涌加在保护装置的长引线上。可能的最严重的高压干扰是由低速隔离开关的操作产生，特别是当集中电容（lumped capacitances）间的电弧拉长时（两集中电容指一个是电容式电压互感器，另一个是柱上电流互感器的接地电容）。所产生的断续电弧会在两电容之间（经过接地网）产生前沿陡峭的电流浪涌。特高压设备所占据的广大地区及其迅速发展，使得有必要考虑于所有的接地网采用相当高的浪涌阻抗所产生的效果。理论上可能达到的这种很高的浪涌电压，已在一定程度上为实验室和现场试验所证实，但在规定出充分的有代表性的数据之前，还须进一步做很多工作。

通过试验发现，浪涌在通往继电器室的多芯电缆上的衰减很小，而用载波设备使用的同轴电缆，则衰减和失真均可忽略不计。在电缆和继电器室地线间，接以小的电容，能抑制浪涌，而且通过分析指出，非线性电阻对此也有效。继电器室终端电缆的连接方法也很重要，因为当电缆在高频时与开路情况等效，则浪涌可能被反射回来并严重增高。同轴电缆低损耗的特点一般被抵消了，而浪涌因终端阻抗匹配的关系被减小。但正常的多芯电缆，除非特殊设计，当它终端接有典型的保护装置时，可能对高频浪涌表现为开路。

为了模拟浪涌，实验室所采取的适当的试验标准仍未解决。不过一般采用一种5KV，1/50 μ S的脉冲试验，电源为0.5焦耳，电容性。然而，经验表明，用试验棒加2KV_{r.m.s.}，的正常的电压提供了对静态保护装置有效的试验。这个方法能产生浪涌，使之如同脉冲试验方法一样有效地考验半导体装置。

在保护装置和电流、电压互感器之间加入具有接地静电屏蔽的隔离变压器，能够显著减轻浪涌对静态保护装置的影响，但应注意这种屏蔽是否接地良好。在接地条件特别不好时，另加非线性电阻是可取的途径，同时在所有的情况下，被采用的电路结构和元件的最后选择必须与浪涌的强度连系起来估计。很多情况下，在浪涌电源和半导体之间加有电阻网络的电

路本身就是防浪涌的，而且可以利用（例如雪崩二极管的）吸收浪涌的特性获得好处。

5. 静态保护装置对有关设备的影响

静态保护装置的出现会影响到有关的设备，而且，当考虑将来在这方面的工作时会带来一些重要的好处，虽然现在还没有完全弄清楚。下面各节将讨论本文保护装置的一些较为重要的项目。

5.1 电流互感器

电流互感器除了磁性材料改进，和采用反应瞬变电流比反应额定电流更为适合的次级分段绕组外，其他电磁结构很少改变。标准仍然规定以稳态准确度表示性能，其二次负荷实际上大于绕组负荷。多年以来，暂态性能问题一直是促使保护装置功率消耗逐渐减小的原因，但是一般地并不缩小电流互感器的体积，这是因为故障电流、一次时间常数以及保护的灵敏度要求都增高了的缘故。在特高压变电所，互相连接的引线加长，引起了附加的问题，静态继电器减小后的负荷比起电流互感器二次绕组及互相连接的引线的负荷来是很小的。因此为了缩小体积和提高性能，需要把继电器安装在（或靠近的）开关柜上，这是低压系统已经采取的一种方式。充其量来说，宁取的设计准则是电流互感器次级短路时的最佳暂态性能。考虑为达到此目的所必需的电流互感器的铜/铁比，由简单的分析表明，现有设计已经差不多达到最佳化了，如图18所示。

如果静态保护装置安装在开关柜上，则只要一个电流互感器就能完成所有保护的要求。这个方案在 33KV 或 66KV 以下的系统是可行的，这里电流互感器的数量影响到开关柜的尺寸，但是在输电电压系统，为了安全起见，仍然宁可采用几个电流互感器。当激励低压开关跳闸线圈的电源来自电流互感器时，要缩小电流互感器的尺寸可能不是那末容易的。

线性耦合器作为克服暂态反应的问题已经考虑过多年〔10〕，但至今犹未广泛应用。静态保护装置可能对此有促进作用，但是线性耦合器的感应性质和低的信号电平，所产生的问题比有铁心的电流互感器（其外部负荷可忽略不计）所存在的问题更加难以解决。获得电流信号的新方法如光学环节（optical links）用于静态保护装置是实际可行的，正在一些实验室里进行研究，而且这种光学环节已在实际中试验过〔11〕。对发展另外一种高压电流互感器的要求是非常强烈的，因为现有继电保护装置的安装价值如表 3 所示，促成了这个倾向。

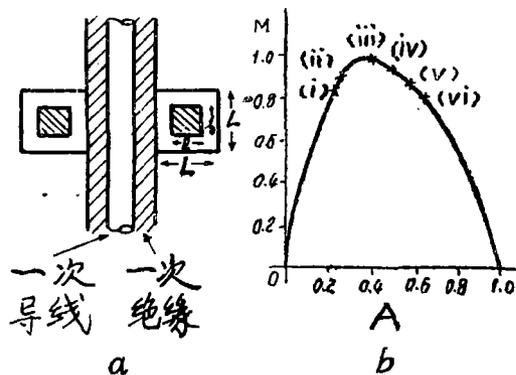


图18 电流互感器设计要求

- a. 基本的电流互感器截面，L—常数 l—变数
b. 典型电流互感器的相对价值

$$M = \text{相对价值} = \frac{\text{膝点电压}}{\text{二次绕组压降}}$$

$$A = \text{铁心面积与总面积之比} \left(\frac{l^2}{L^2} \right)$$

- (i) 275KV (母线保护)
(ii) 400KV (母线保护)
(iii) 275KV
(iv) 400KV
(v) 132KV
(vi) 11KV

表3 每一电路以单位计算的平均价值

	室 内	室 外		
	33KV	132KV	275KV	400KV
电路总平均价值	10.0	50.0	100.0	230.0
继 电 器	0.7	2.5	2.4	4.6
继 电 器 盘	0.4	0.6	1.5	2.3
连接线(金属外皮)	0.9	2.0	0.8	0.9
继 电 器 室	0.32	0.5	0.5	1.0
电 流 互 感 器	0.4	4.7	12.0	25.7
电 压 互 感 器	1.0	3.4	7.0	9.0

5.2 电压互感器

和电流互感器一样,电压互感器的性能是由比静态保护装置负荷大许多倍的外部负荷决定的,例如一套全晶体管距离保护装置的电压互感器的负荷是1.5VA/相(见表2),而外部负荷为150VA。电压互感器所要求的额定输出如此下降,可利用于各种不同的用途。例如为了供给继电器一定的补充电能所必需的电磁型和电容型的电压互感器的尺寸可以缩小,因而减少造价和体积。或者,其实际应用会受到影响,现在电容式电压互感器只是用在输电电压下是经济的,将来能用在低压时也很经济,而且可能采用相当小的电容量与开关装为一体如套管式的。对于输电电压,调谐电容电压互感器的暂态反应问题,在快速的保护装置中要加以强调,不过利用静态保护装置的无功功率消耗小这一点,可以方便地解决这个问题。为了获得同步时的母线电压信号,在特高压变电所正在用空气电容探针(air spaced capacitance probes)进行的实验,提供了说明静态继电器价值的例子。

5.3 设备供应

现在供应继电器的方法,已经经过了多年使用常规的继电器而得到发展。如果要获得静态继电器的全部利益,必须重新检验这些方法,以达到可以接受的最经济的供应方式。表3列举了典型开关设备各元件的相对价值。设备费用是很大的,特别是在高压变电所,保护装置非常复杂,而且采用两套重复的设备。为了安装设备而增加面积是附加的问题,这个问题对于城市高压变电所尤为突出。

当前考虑设备供应的主要根据如下:

- (a) 应具备适当条件使电磁继电器长期工作良好;
- (b) 调试维护方便;
- (c) 容易核对继电器的信号。

重新考虑设计正确的静态保护装置要求满足上述条件的程度,认为继电器及保护装置的安装地点应靠近开关柜。同时仍然需要考虑设备内部电路元件易于调试和更换,不过这点对于静态保护装置来说是完全可能的,例如一般采用框架安装方式的微型组件,可以在中心实验室比就地更有效地进行试验。

5.4 信号指示与记录

目前以保护装置本身几个机械动作信号或控制室音响信号为基础的信号指示方式,当继

电器的安装地点改变时(如第5.3节所述),需要重新考虑。继电器掉牌主要用于分析事故,不过在这一方面它不总是可靠的。除了最后的电磁跟闸外,机械掉牌是不与静态继电器共存的,如有必要安装机械掉牌,必需在静态保护电路中单独设置机电元件。作为过渡阶段,静态保护装置趋向于保留保护的局部掉牌。英国所采用的自动记录装置提供了详细可靠的信息,将来可以代替机电式掉牌。在高压设备上,自动录波器提供的信息能补充这种自动记录装置的不足之处。

6. 结 论

很多正在运行中的保护装置拥有许多静止的元件,不过其中包含有以近代半导体为基础的元件的保护装置是相当少的。电力系统设备方面新的发展是小心地进行的,而且要在普遍推广以前,经过长期的考验。特别是静态保护装置是如此,现已有多种静态保护装置作出了样机,但是安装使用的为数尚少。

静态继电器与常规继电器在价值上的比较,在过去,前者贵50~100%。现在有些简单的继电器如时间继电器已达到价值上的平衡,对于较复杂的品种如距离继电器,则静态继电器的价值较贱。当然用这种比较价值的方法,忽略了性能方面的改进以及节约有关设备的可能性,因此使用这种比较方法时必须注意这点。

静态保护装置的研究实验开展起来比电磁继电器的要快,但是经验表明,由成功的实验品转变成适于制造和满足型式试验的工业产品,可能要更多的时间。静态保护装置因其具有相当大的互相依赖性,故需要将实验阶段和发展阶段合并在一起。

元件的不断改进和新元件的引入,在更新的和更好的技术成为可以利用的条件以前,有时难以在实际设计中推行。这就强调了需要从事元件的研究与发展和在实验室从事元件应用研究的这两者之间的密切接触。发展静态继电器的主要经验是,保护装置的特性通常是再现了常规保护装置的已知特性,只是功率消耗减小了,性能没有太大改进。这方面的经验还说明,除了少数例外,静态保护装置运行时的可靠性比机电式的装置好。静态保护装置的潜在优点只是部分地实现了,当前应看作是它发展和应用的新阶段,在这个阶段,将集中在利用它引进新的特性和新的保护概念。与此同时,为了满足近代电力系统日益增长的需要所必备的性能,将毫无疑问地被发掘出来。

目前的情况是大部分的努力来自制造厂一方面,但是对于用户在新的保护系统的发展和发掘其优点方面给予合作的要求日益增长。广泛应用静态保护装置的机会,势必从这种合作中得到发展。

译自 PIEE 1967 Vol. 114 No. 2