

绪 论

一、继电保护的作用

电力系统由发电机、变压器、母线、输配电线路及用电设备组成。各电气元件及系统整体通常处于正常运行状态，但也可能出现故障或异常运行状态。在三相交流系统中，最常见同时也是最危险的故障是相与相或相与地（或中线）之间的非正常连接，即短路。直接连接（不考虑过渡电阻）的短路一般称为金属性短路。电力系统的正常工作遭到破坏，但未形成故障，则称为异常工作状态。

与其它电气元件比较，输电线路所处的条件决定了它是电力系统中最容易发生故障的一环。在输电线路上，还可能发生一相或两相断线及几种故障同时发生的复杂故障。变压器和各种旋转电机所特有的一种故障形式是同一相绕组上的匝间短路。短路总要产生很大的短路电流，同时使系统中电压大大降低。短路点的电流及短路电流的热效应和机械效应会直接损坏电气设备。电压下降影响用户的正常工作，影响产品质量。短路更严重的后果是因电压下降可能导致了电力系统发电厂之间并列运行的稳定性遭受破坏，引起系统振荡，直至使整个系统瓦解。

最常见的异常运行状态是电气元件的电流超过其额定值，即过负荷状态。长时间的过负荷会使电气元件的载流部分和绝缘材料的温度过高，从而加速设备的绝缘老化，或损坏设备，甚至发展成事故。此外，由于电力系统出现功率缺额而引起的频率降低，水轮发电机组突然甩负荷引起的过电压，以及电力系统振荡等，都属于异常运行状态。

故障和异常运行状态都可能发展成系统中的事故。所谓事故，是指整个系统或其中一部分的正常工作遭到破坏，以致造成对用户少送电、停止送电或电能质量降低到不能容许的地步，甚至造成设备损坏和人身伤亡。

在电力系统中，为了提高供电可靠性，防止造成上述严重后果，一是要对电气设备进行正确的设计、制造、安装、维护和检修，力求减少发生故障的可能性；二是对异常运行状态必须及时发现，并采取措施予以消除；三是一旦发生故障，必须迅速并有选择性地切除故障元件。

电力系统各元件之间是通过电或磁联系在一起，任一元件发生故障时，都可能立即在不同程度上影响到系统的正常运行。因此，切除故障元件的时间常常要求短到十分之几秒甚至百分之几秒。显然，在这样短的时间内，由运行人员来发现故障元件并将它切除是不可能的。要完成这样的任务，必须在每一电气元件上装设具有保护作用的自动装置。早期采用的这种装置是熔断器，目前在电压较低的配电网中也还在采用。随着电气设备容量的增大和电压的增高，以及电力系统接线的日益复杂，熔断器已经不能满足要求，于是继电保护装置得到了应用和发展。

继电保护装置是一种能反应电力系统中电气元件发生的故障或异常运行状态，并动作于断路器跳闸或发出信号的一种自动装置。它的基本任务是：

(1) 当电力系统的被保护元件发生故障时，继电保护装置应能自动、迅速、有选择地将故障元件从电力系统中切除使故障元件免于继续遭受损害，并保证无故障部分迅速恢复正常运行。

(2) 当电力系统被保护元件出现异常运行状态时，继电保护应能及时反应，并根据运行维护条件而动作，发出信号、减负荷或跳闸。此时一般不要求保护迅速动作，而是根据对电力系统及其元件的危害程度规定一定的延时，以免不必要动作和由于干扰而引起的误动作。

二、继电保护的基本原理和保护装置的组成

为了完成继电保护所担负的任务，显然应该要求它能够正确地区分系统正常运行与发生故障或异常运行状态之间的差别，以实现保护。

如图 0-1 所示的网络接线，在电力系统正常运行时，每条线路上都流过由它供电的负荷电流，越靠近电源端的线路上的负荷电流越大。同时，各变电所母线上的电压，一般都在额定电压 $\pm (5\% \sim 10\%)$ 的范围内变化，且靠近电源端母线上的电压较高。线路始端电压与电流之间的相位决定于由它供电的负荷的性质和线路的参数。由电压与电流之比值所代表的“测量阻抗”，则是在线路始端所感受到的、由负荷所反应出来的一个等效阻抗，其值一般很大。

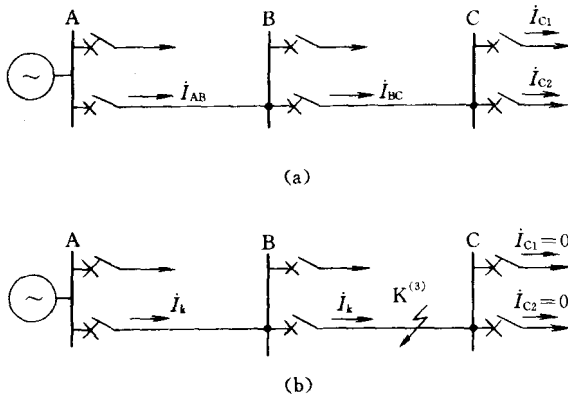


图 0-1 单侧电源网络接线

(a) 正常运行情况；(b) K 点三相短路情况

当电力系统发生短路故障时，如图 0-1 (b) 所示。假定在线路 BC 上发生了三相短路，则短路点的电压 U_K 降低到零，从电源到短路点之间均将流过很大的短路电流 I_K ，各变电所母线上的电压也将不同程度上有很大的降低，距短路点越近时降得越多。设以 Z_K 表示短路点到变电所 B 母线之间的阻抗，则母线上的残余电压应为 $U_{KB} = I_K Z_K$ 。此时 U_{KB} 与 I_K 之间的相位角就是 Z_K 的阻抗角，在线路始端的测量阻抗就是 Z_K ，此测量阻抗的大小正比于短路点到变电所 B 母线之间的距离。

在一般的情况下，发生短路之后，总是伴随着电流的增大、电压的降低、线路始端测量阻抗的减小，以及电压与电流之间相位角的变化。因此，利用正常运行与故障时这些基本参数的区别，便可以构成各种不同原理的继电保护，例如：反应电流增大而动作的过电流保护；反应电压降低而动作的低电压保护；反应短路点到保护安装地点之间的距离而动作的距离保护（或阻抗保护）等。

此外，从电力系统中的任一电气元件来看，在正常运行的某一瞬间，负荷电流总是从一侧流入而从另一侧流出，如图 0-2 (a) 中的 AB 线路。如果规定电流的正方向都是从母线流向线路，那么，按照规定的正方向，线路 AB 两侧电流的大小相等，而相位相差 180° 。当在线路 AB 的范围以外 K1 点短路时，如图 0-2 (b) 所示，由 A 侧电源所提供给的短路电

流 I'_{K1} 将流过线路 AB, 此时 AB 两侧的电 流仍然是大小相等相位相反, 其特征与正常运行时一样。如果短路发生在线路 AB 范围内, 如图 0-2 (c) 所示, 由于两侧电源均分别向短路点 K2 供给短路电流 I'_{K2} 和 I''_{K2} , 因此, 在线路 AB 两侧的电 流都是由母线流向线路, 此时两个电流的大小一般不相等。若假设两侧电势同相位且系统阻抗角相等, 则两个电流同相位。

利用每个电气元件在内部故障与外部故障及正常运行时, 两侧电流相位或功率方向的差别, 就可以构成各种差动原理的保护, 如纵联差动保护、相差高频保护、方向高频保护等。差动原理的保护只能在被保护元件的内部故障时动作, 而不反应外部故障, 因而被认为具有绝对的选择性。

在按照上述原理构成各种保护装置时, 可以使它们的参数反应于每相中的电流和电压, 也可以使之仅反应于其中一个对称分量的电流和电压。在正常运行情况下, 负序和零序分量不会出现; 在发生不对称接地短路时, 它们都具有较大的数值; 在发生不接地的不对称短路时, 虽然没有零序分量, 但负序分量却很大。因此, 利用这些分量构成的保护装置, 一般都具有良好的选择性和灵敏性, 这正是这种保护装置获得广泛应用的原因。

除上述反应各种电气量的保护外, 还有根据电气设备的特点实现反应非电气量的保护。例如, 当变压器油箱内部的绕组短路时, 反应油分解所产生的气体而构成的瓦斯保护等。

以上各种原理的保护, 可以由一个或若干个继电器连接在一起组成保护装置来实现。

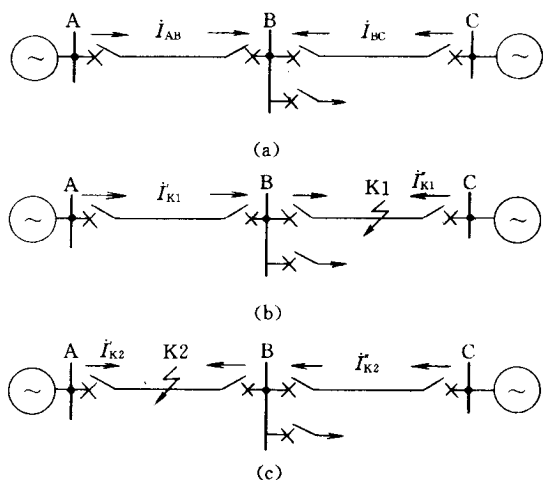


图 0-2 双侧电源网络接线

(a) 正常运行情况; (b) K1 点短路时的电流分布;
(c) K2 点短路时的电流分布

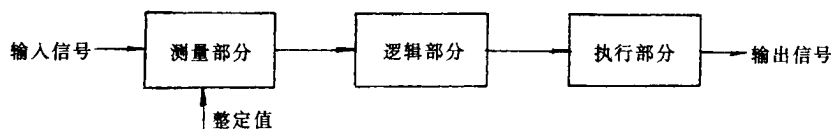


图 0-3 继电保护装置的原理方框图

一般而言, 整套继电保护装置是由测量部分、逻辑部分和执行部分组成的, 其原理结构如图 0-3 所示, 其作用如下。

(1) 测量部分。测量部分是测量从被保护对象输入的有关物理量, 并与给定的整定值进行比较, 根据比较的结果, 给出“是”或“非”性质的一组逻辑信号, 从而判断保护是否应该起动。

(2) 逻辑部分。逻辑部分是根据测量部分各输出量的大小、性质、输出的逻辑状态、出现的顺序或它们的组合, 使保护装置按一定的逻辑关系工作, 然后确定是否应该使断路器跳闸或发出信号, 并将有关命令传给执行部分。继电保护中常用的逻辑回路有“或”、“与”、“否”、“延时起动”、“延时返回”以及“记忆”等回路。

(3) 执行部分。执行部分是根据逻辑部分传送的信号，最后完成保护装置所担负的任务。如故障时，动作于跳闸，异常运行时，发出信号；正常运行时，不动作等。

三、对电力系统继电保护的基本要求

电力系统各电气元件之间通常用断路器互相连接，每台断路器都装有相应的继电保护装置，可以向断路器发出跳闸脉冲。继电保护装置是以各电气元件或线路作为被保护对象的，其切除故障的范围是断路器之间的区段。防御发电机、变压器、输电线路故障的保护装置，分别称为发电机保护、变压器保护及线路保护。

实践表明，继电保护装置或断路器有拒绝动作的可能性，因而需要考虑后备保护。实际上，每一电气元件一般都有两种继电保护装置：主保护和后备保护，必要时还另外增设辅助保护。

反应整个被保护元件上的故障并能以最短的延时有选择性地切除故障的保护称为主保护。

主保护或其断路器拒绝动作时，用来切除故障的保护称为后备保护。后备保护分近后备和远后备两种：主保护拒绝动作时，由本元件的另一套保护实现后备，谓之近后备；当主保护或其断路器拒动时，由相邻元件或线路的保护实现后备的，谓之远后备。

为补充主保护和后备保护的不足而增设的简单的保护称为辅助保护。

对于反应短路故障的继电保护装置，应满足可靠性、选择性、灵敏性和速动性等基本要求。

1. 可靠性

保护装置的可靠性是指在规定的保护区内发生故障时，它不应该拒绝动作，而在正常运行或保护区外发生故障时，则不应该误动作。

可靠性主要指保护装置本身的质量和运行维护水平而言。不可靠的保护本身就成为了事故的根源。因此，可靠性是对继电保护装置的最根本要求。

为保证可靠性，一般来说，宜选用尽可能简单的保护方式；应采用由可靠的元件和简单的接线构成的性能良好的保护装置，并应采取必要的检测、闭锁和双重化等措施。当电力系统中发生故障而主保护拒动时，靠后备保护的动动作切除故障，有时不仅扩大了停电范围，而且拖延了切除故障的时间从而对电力系统的稳定运行带来很大危害。因此，对电力系统中重要的电气元件有时采用并联使用两套保护的所谓双重化措施。此外，使保护装置便于整定、调试和运行维护，对于保证其可靠性也具有重要的作用。

2. 选择性

保护装置的选择性是指保护装置动作时，仅将故障元件从电力系统中切除，使停电范围尽量缩小，以保证电力系统中的无故障部分仍能继续安全运行。

在图 0-4 所示的网络中，当线路 L₄ 上 K₂ 点发生短路时，保护装置 6 动作，跳开断路器 6QF，将 L₄ 切除，继电保护的这种动作是有选择性的。K₂ 点故障，若保护装置 5 动作，将 5QF 断开，则变电所 C 和 D 都将停电，继电保护的这种动作是无选择性的。同样 K₁ 点故障时，保护 1 装置和保护 2 装置动作，断开 1QF 和 2QF，将故障线路 L₁ 切除，这是有选择性的。

如果 K₂ 点故障，而保护装置 6 或断路器 6QF 拒动，保护 5 动作，断开 5QF，将故障

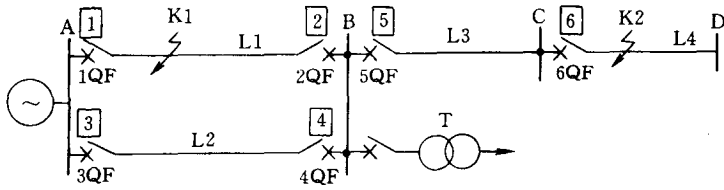


图 0-4 单侧电源网络中，保护选择性动作说明图

切除。这种情况虽然是越级跳闸，但却是尽量缩小了停电范围，限制了故障的发展，因而也认为是有选择性动作。

应该指出，运行经验表明，架空线路上发生的短路故障大多数是瞬时性的，线路上的电压消失后，短路会自行消除。因此，在某些条件下，为了加速切除短路，允许采用无选择性的保护，但必须采取相应措施，例如采用自动重合闸或备用电源自动投入装置予以补救。

为了保证选择性，对相邻元件有后备作用的保护装置，其灵敏性与动作时间必须与相邻元件的保护相配合。

3. 灵敏性

保护装置的灵敏性是指保护装置对其保护区内发生故障或异常运行状态的反应能力。满足灵敏性要求的保护装置应该是在规定的保护区内短路时，不论短路点的位置、短路形式及系统的运行方式如何，都能灵敏反应。保护装置的灵敏性一般用灵敏系数 K_{sen} 来衡量。

对于反应故障时参数增大而动作的保护装置，其灵敏系数是

$$K_{sen} = \frac{\text{保护区末端金属性短路时故障参数的最小计算值}}{\text{保护装置的动作参数}}$$

对于反应故障时参数降低而动作的保护装置，其灵敏系数是

$$K_{sen} = \frac{\text{保护装置的动作参数}}{\text{保护区末端金属性短路时故障参数的最大计算值}}$$

实际上，短路大多情况是非金属性的，而且故障参数在计算时会有一定误差，因此，必须要求 $K_{sen} > 1$ 。在部颁的《继电保护和自动装置技术规程》中，对各类短路保护装置的灵敏系数最小值都作了具体规定。对于各种保护装置灵敏系数的校验方法，将在该保护的整定计算中分别讨论。

4. 速动性

快速地切除故障可以提高电力系统并列运行的稳定性，减少用户在电压降低情况下的工作时间，限制故障元件的损坏程度，缩小故障的影响范围以及提高自动重合闸装置和备用电源自动投入装置的动作成功率等。因此，在发生故障时，应力求保护装置能迅速动作切除故障。

动作迅速而同时又能满足选择性要求的保护装置，其结构一般都比较复杂，价格比较贵。因此，应根据电力系统的实际情况，对保护的速动性提出合理的要求。电力系统一般情况下，允许保护装置带有一定的延时切除故障。

故障切除时间 t 等于保护装置的动作时间与断路器的动作时间之和。目前，世界上正

式投入运行的保护，动作速度最快的为 0.02s，断路器的动作时间最快的为 0.05~0.06s，则最快切除故障时间为 0.07~0.08s。

对作用于跳闸的保护装置的基本要求，一般也适用于反映异常运行状态的保护装置。只是对作用于信号的保护装置不要求快速动作，而是按照选择性要求延时发出信号。

上述四项基本要求是互相联系而又互相矛盾的。例如，对某些保护装置来说，选择性和速动性不可能同时实现，要保证选择性，必须使之具有一定的动作时间。

继电保护技术是随着电力系统的发展，在不断解决保护装置应用中出现的四项基本要求之间的矛盾，使之在一定条件下达到辩证统一的过程中发展起来的。因此，四项基本要求是分析研究各种继电保护装置的基础，是贯穿本课程的一条基本线索。在本课程的学习过程中，应该注意学会按对保护基本要求的观点，去分析每种保护装置的性能。

在电力系统中，当确定继电保护装置的配置和构成方案时，还应适当考虑经济上的合理性。应综合考虑被保护元件与电力网的结构特点、运行特点及故障出现的概率和可能造成的后果等因素，依此确定保护方式，而不能只从保护装置本身的投资来考虑。因保护不完善或不可靠而给国民经济造成的损失，一般会大大超过即使是最复杂的保护装置的投资。当然也应注意，对于较次要的被保护对象，不应装设复杂、昂贵的保护装置。

四、继电器

继电器是各种继电保护装置的基本组成元件。它是一种自动元件。一般来说，按预先整定的输入量动作，并具有电路控制功能的元件称为继电器。即继电器的工作特点是，用来表征外界现象的输入量达到整定值时，其输出电路中的被控电气量将发生预定的阶跃变化。

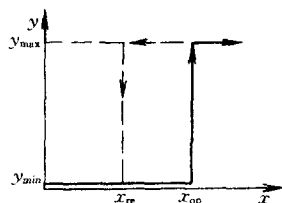


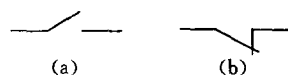
图 0-5 继电特性

继电器的输入量和输出量之间的关系如图 0-5 所示，图中 x 是加于继电器线圈的输入量， y 是继电器接点电路中的输出量。当输入量 x 从零开始增加时，在 $x < x_{op}$ 的过程中，输出量 $y = y_{min}$ 保持不变 ($y_{min} \approx 0$)。当 $x = x_{op}$ 时， y 突然由 y_{min} 变到 y_{max} (接点断开或闭合)，称为继电器动作。当输入量减小时，在 $x > x_{re}$ 的过程中， y 仍保持 y_{max} 不变。当 x 降到 x_{re} 时， y 突然由 y_{max} 下降到 y_{min} 称为继电器返回。对于反应输入量上升而动作的继电器， x_{op} 和 x_{re} 分别叫做继电器的动作值和返回值。返回值与动作值的比值称为继电器的返回系数，以 K_{re} 表示，即

$$K_{re} = \frac{x_{re}}{x_{op}} \quad (0-1)$$

K_{re} 是表征继电器的性能好坏的参数之一。图 0-5 所示的这种输入量是连续 (或阶跃) 变化，而输出量总是跃变的特性，称为继电特性。从广义上来讲，凡是具有继电特性的元件，均称为继电器。

通常，继电器在没有输入量 (或输入量未达到整定值) 的状态下，断开着的触点称为常开触点；闭合着的触点称为常闭触点。图



0-6 示出触点的表示方法，常开触点也称动合触点，常闭触点又称图 0-6 继电器触点表示法 (a) 常开触点；(b) 常闭触点

动断触点。

使继电器的正常位置时的功能产生变化，称为起动。继电器完成所规定的任务，称为动作。继电器从动作状态回到初始位置，称为复归。继电器失去动作状态下的功能，称为返回。

电力系统继电保护装置用的继电器，称为保护继电器，按输入物理量的不同分为电气继电器与非电气继电器两类。后者只有瓦斯继电器、温度继电器及压力继电器等很少几种，电气继电器的种类则比较多。

国产的保护继电器，一般用汉语拼音字母表示出它的型号。型号中第一个字母表示继电器的工作原理。第二（或第三）个字母代表继电器的用途。例如 DL 代表“电”磁型电“流”继电器，LCD 代表整“流”型“差动”继电器。常用的继电器型号中字母的意义如表 0-1 所列。

表 0-1 常用保护继电器型号中字母的含义

第一个字母	第二、第三个字母	
D—电磁型	L—电流继电器	Z—阻抗继电器或中间继电器
L—整流型	Y—电压继电器	FY—负序电压继电器
B—半导体型	G—功率方向继电器	FL—负序电流继电器
J—极化型或晶体管型	X—信号继电器	CD—差动继电器
	D—接地继电器	ZB—中间继电器有自保持

表 0-2 继电器线圈和触点的表示方法

名称	图形符号	名称	图形符号	名称	图形符号
继电器		极化继电器线圈		动断触点（常闭）	
中间继电器		非电量动合触点		先断后合的转换触点	
功率方向继电器		中间断开的双向触点		延时闭合的动合触点	
继电器线圈		电流继电器		延时断开的动合触点	
继电器额定特性线圈		信号继电器		非动量动断触点	
继电器额定吸合线圈		动合触点（常开）		延时断开的动断触点	

五、继电保护的发展

电力系统继电保护技术是随着电力系统的发展而发展的，首先是与电力系统对运行可靠性要求的不断提高密切相关的。熔断器就是最初出现的简单过电流保护。这种保护时至今日仍广泛应用于低压线路和用电设备。熔断器的特点是融保护装置与切断电流的装置于一体，因而最为简单。由于电力系统的发展，用电设备的功率、发电机的容量不断增大，发

电厂、变电所和供电电网的接线不断复杂化，电力系统中正常工作电流和短路电流都不断增大，单纯采用熔断器保护就难以实现选择性和快速性要求，于是出现了作用于专门的断流装置（断路器）的过电流继电器，利用继电器和断路器的配合来切除故障设备。上个世纪 90 年代出现了装于断路器上并直接作用于断路器的一次式的电磁型过电流继电器。本世纪初随着电力系统的发展，继电器开始广泛应用于电力系统的保护。这个时期可认为是继电保护技术发展的开端。

1901 年出现了感应型过电流继电器。1908 年提出了比较被保护元件两端电流的电流差动保护原理。1910 年方向性电流保护开始得到应用，在此时期也出现了将电压与电流相比较的保护原理，并导致了本世纪 20 年代初距离保护装置的出现。随着电力系统的载波通讯发展，在 1927 年前后，出现了利用高压输电线路高频载波电流传送和比较输电线路两端功率方向或电流相位的高频保护装置。在 50 年代，微波中继通讯开始应用于电力系统，从而出现了利用微波传送和比较输电线路两端故障电气量的微波保护。早在 50 年代就出现了利用故障点产生的行波实现快速继电保护的设想，经过 20 余年的研究，终于诞生了行波保护装置。显然，随着光纤通讯在电力系统中的大量采用，利用光纤通道的继电保护也必将得到广泛的应用。

与此同时，构成继电保护装置的元件、材料、保护装置的结构型式和制造工艺也发生了巨大的变革。50 年代以前的继电保护装置都是由电磁型、感应型或电动型继电器组成的。这些继电器都具有机械转动部件，统称为机电式继电器。由这些继电器组成的继电保护装置称为机电式保护装置。机电式继电器所采用的元件、材料、结构型式和制造工艺在近 30 余年来，经历了重大的改进，积累了丰富的运行经验，工作比较可靠，因而目前仍是电力系统中应用较广的保护装置。但是，这种保护装置体积大，消耗功率大，动作速度慢，机械转动部分和触点容易磨损或粘连，调试维护比较复杂，不能满足超高压、大容量电力系统的要求。

本世纪 50 年代，由于半导体晶体管的发展，开始出现了晶体管式继电保护装置。这种保护装置体积小，功率消耗小，动作速度快，无机械转动部分，称为电子式静态保护装置。晶体管保护装置易受电力系统中或外界的电磁干扰的影响而误动或损坏，当时其工作可靠性低于机电式保护装置。但经过 20 余年长期的研究和实践，抗干扰问题从理论上和实践上都得到了满意的解决，使晶体管继电保护装置的正确动作率达到了和机电式保护装置同样的水平。70 年代是晶体管继电保护装置在我国大量采用的时期，满足了当时电力系统向超高压、大容量方向发展的需要。

由于集成电路技术的发展，可以将数十个或更多的晶体管集成在一个半导体芯片上，从而出现了体积更小、工作更加可靠的集成运算放大器和集成电路元件。这促使静态继电保护装置向集成电路化方向发展。80 年代后期，标志着静态继电保护从第一代（晶体管式）向第二代（集成电路式）的过渡。目前，集成电路静态继电保护装置已成为静态继电保护装置的主要形式。

在 60 年代末，就提出用小型计算机实现继电保护的设想。因为当时小型计算机价格昂贵，难以在实用上采用。但由此开始了对继电保护计算机算法的大量研究，对后来微型计算机式继电保护的发展奠定了理论基础。随着微处理器技术的迅速发展及其价格急剧下降，

在 70 年代后半期，出现了比较完善的微型计算机保护样机，并投入到电力系统中试运行。80 年代微型计算机保护在硬件结构和软件技术方面已趋成熟，并已在一些国家推广应用，这就是第三代的静态继电保护装置。微型计算机保护具有巨大的计算、分析和逻辑判断能力，有存储记忆功能，因而可用以实现任何性能完善且复杂的保护原理。微型计算机保护可连续不断地对本身的工作情况进行自检，其工作可靠性很高。此外，微型计算机保护可用同一个硬件实现不同的保护原理，这使保护装置的制造大为简化，也容易实行保护装置的标准化。微型计算机保护除了保护功能外，还有故障录波、故障测距、事故顺序纪录和调度计算机交换信息等辅助功能，这对简化保护的调试、事故分析和事故后的处理等都有重大意义。由于微型计算机保护装置的巨大优越性和潜力，因而受到运行人员的欢迎，进入 90 年代以来，在我国得到大量应用，将成为继电保护装置的主要型式。可以说微型计算机保护代表着电力系统继电保护的未來，将成为未來电力系统保护、控制、运行调度及事故处理的统一计算机系统的组成部分。

习 题

- 0-1 何谓电力系统的“故障”、“异常运行状态”与“事故”？
- 0-2 何谓继电保护装置？它的作用是什么？
- 0-3 何谓主保护、后备保护及辅助保护？何谓近后备和远后备？
- 0-4 何谓继电器与继电特性？为什么要求保护继电器必须具有继电特性？
- 0-5 继电器的常开触点与常闭触点如何区分？
- 0-6 继电保护装置一般有哪些组成部分？各部分有何作用？
- 0-7 说明“继电器”、“继电保护装置”和“继电保护”的含义和区别。

第一章 继电保护装置的基础元件

第一节 电流互感器和电压互感器

一、电流互感器

在继电保护回路中，电流互感器是用来将二次电流回路与一次电流的高压系统隔离，将系统的一次电流按比例地变换成二次电流。另外，利用电流互感器还可以取得保护装置所必须的相电流的各种组合，还可以扩大仪表、继电器的使用范围。通常电流互感器的二次绕组设置安全接地，其二次额定电流为 5A 或 1A。

(一) 电流互感器的极性

为了最简便、最直观地分析继电保护的工作，判别电流互感器一次电流与二次电流间的相位关系，应按规定标示电流互感器绕组的极性。

电流互感器一次和二次绕组的极性习惯用减极性原则标注，即当一次、二次绕组中同时向同极性端子加入电流时，它们在铁心中所产生的磁通方向相同。如图 1-1 (a)、(b) 所示，L1 与 K1 (或 L2 与 K2) 为同极性端；用“*”号表示，当系统一次电流从同极性端子 L1 流入时，在二次绕组中感应出的电流应从同极性端子 K1 流出，按照上述原则标注电流方向，并忽略励磁电流，铁心中的合成磁势应为一次绕组和二次绕组磁势的相量差。

$$\dot{I}_1 W_1 - \dot{I}_2 W_2 = 0$$

即
$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 W_1 / W_2 = \dot{I}_1 / n_{TA} = \dot{I}_1$$
 (1-1)

$$n_{TA} = W_2 / W_1 = I_1 / I_2$$

式中 I_1 、 I_2 ——电流互感器的一、二次电流；

I_1 ——换算到二次侧的一次电流；

W_1 、 W_2 ——一、二次绕组的匝数；

n_{TA} ——电流互感器的变比。

从式 (1-1) 可见， I_1 与 I_2 大小相等、方向相同，见图 1-1 (c)。

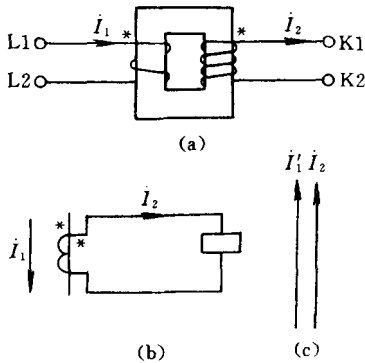


图 1-1 电流互感器的极性标注

(二) 电流互感器的误差

电流互感器是变压器的一种特殊形式，其等值电路可用 T 型等值电路表示。由于电流互感器二次侧所接负载是测量表计和继电器的电流线圈，这些线圈的阻抗很小。另外，电流互感器的一次绕组匝数很少，而二次绕组的匝数相对较多，这样，把二次侧的负荷阻抗换算到一次侧后，与系统阻抗相比是极其微弱的，因此，电流互感器是工作在二次侧接近短路状态，相当于一个电流源（这是与普通变压器不同的）。当所有参数都换算到二次侧，按图 1-1 规定的正方向，考虑励磁电流，可作出电流互感器的相量图。从图 1-2 可以

看出，由于励磁电流的存在电流互感器的一、二次电流相量 I_1 和 I_2 大小不相等，相位不同，说明电流转换中存在误差。电流互感器的误差有三种：电流误差 f_k 、相位误差 δ_i 、复合误差 ϵ_i 。

电流误差：又称比值差，它等于二次电流 I_2 与一次侧换算到二次侧的电流 I_1 有效值的算术差（相量图中的 ΔI ）。

$$f_i = (I_2 - I_1')/I_1' \times 100\% \quad (1-2)$$

相位误差：用 I_1' 与 I_2 相位差角 δ_i 的大小表示。 δ_i 数值很小，习惯上规定 I_2 比 I_1' 超前时， δ_i 为正。

复合误差：电流互感器在稳态情况下两个瞬时电流之差的有效值，通常以一次电流有效值的百分数表示。

$$\epsilon_i = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{i_1}{n_{TA}} - i_2 \right)^2 dt} \quad (\%) \quad (1-3)$$

式中 T ——电流的周期（0.02s）；

i_1 ——一次电流瞬时值；

i_2 ——二次电流瞬时值。

对于继电保护用的电流互感器，规程规定：电流误差不得大于 10%，角度误差不应超过 7°。

(三) 10%误差曲线

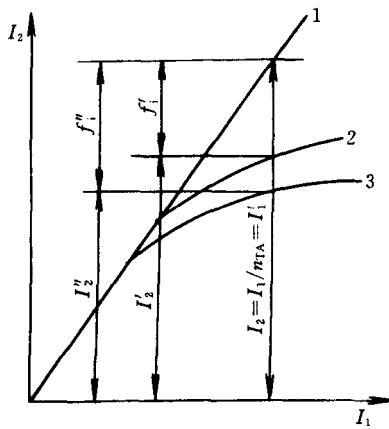


图 1-3 电流互感器在不同的负载阻抗下 I_1 与 I_2 的关系曲线

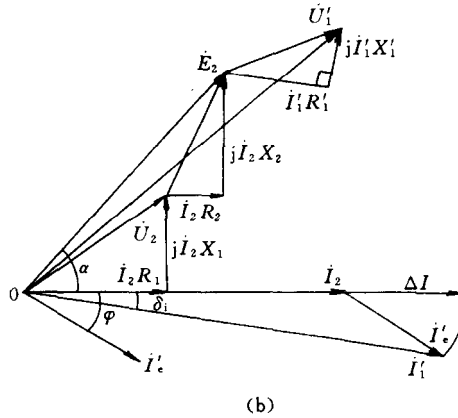
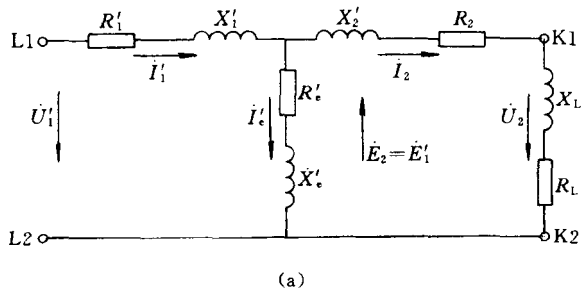


图 1-2 电流互感器的等值电路及相量图

(a) 等值电路图；(b) 相量图

从相量图可以看出，电流互感器的误差主要是由于励磁电流 I_e' 引起，从等值电路得到

$$I_e' = E_2/Z_e' = I_2(Z_2 + Z_L)/Z_e' \quad (1-4)$$

所以， I_e' 与负荷阻抗 Z_L 和二次电流 I_2 成正比，与励磁阻抗 Z_e' 成反比。 Z_e' 不是一个常数，与铁心的磁化特性有关，电流互感器在不同负载阻抗下，其 I_2 与 I_1 的关系曲线如图 1-3 所示，图中直线 1 是按额定变比计算的 I_2 与 I_1 的关系曲线；曲线 2 是铁心饱和及 Z_e' 变化后的 I_2 与 I_1 的关系曲线；随着 I_1 增加，铁心饱和 Z_e' 迅速减少，而 I_e' 急剧增大，故二次电流 I_2' 比理想值 I_2 下降许多；曲线 3 和曲线 2 不同之处是 Z_L 较大，铁心饱和更快，因而二次电流 I_2' 更小。由此可知，产生电流互感器误差的主要原

因是二次绕组所接负载阻抗和一次电流。后者一般用一次电流倍数 m 表示，所谓一次电流倍数，是指一次侧实际电流与额定电流之比，即： $m = I_1 / I_{1n}$ 。为便于校验电流互感器的准确度，制造厂家把每一种电流互感器的电流误差为 10%，角度误差不超过 7°时，允许的一次电流倍数和相应的允许二次负载绘制成一条曲线，这条曲线称为电流互感器的 10% 误差曲线。如图 1-4 (b) 所示。如实际的一次电流倍数（纵坐标）与二次负载（横坐标）的交点在这条曲线之下，则电流互感器的误差就不超过允许值。

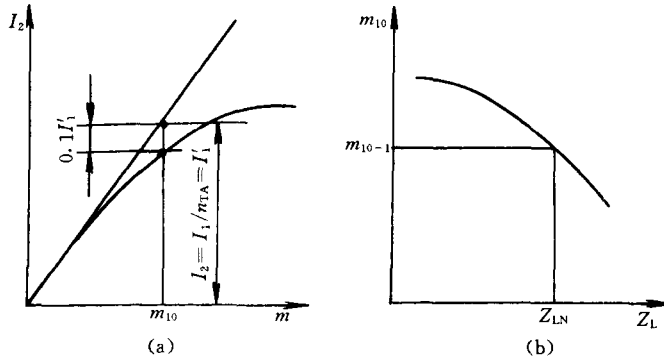


图 1-4 电流互感器二次电流与一次电流倍数的关系曲线

应该指出，在 10% 误差时电流互感器就工作在磁化曲线的弯曲点见图 1-4 (a)，即达到饱和的起始点，对应于该点的一次电流及一次电流倍数分别叫电流互感器的一次饱和电流 $I_{1.sat}$ 和饱和电流倍数 m_{10} 。为了利用 10% 误差曲线来校验电流互感器的准确度，必须先求出实际的一次电流倍数和负载阻抗，对于不同类型的保护，在计算一次电流倍数时，不一定都按实际可能出现的最大短路电流计算，而二次负载与保护接线、故障形式有关，所以在具体计算中应根据实际情况采用最严重的计算条件。

二、电压互感器

电压互感器的作用是：将一次高压系统与二次设备的低压系统隔离；将系统的一次电压按电压互感器的变比变换为数值较小的二次电压。电压互感器二次侧的额定相间电压一般规定为 100V。电压互感器不同于电流互感器，二次侧所接入的负载是继电器的电压线圈，其阻抗值比较大，二次侧接近开路状态，相当于一个电压源。系统短路时电压降低，电压互感器不存在铁心饱和问题，能真实地反应一次电压的突然变化。另外，电压互感器的二次侧都应保安接地，以防止互感器一、二次线圈间绝缘损坏时，高压对二次设备和工作人员的危害。

(一) 电压互感器的极性

电压互感器一、二次绕组间的极性与电流互感器一样，按照减极性原则标注。如图 1-5 所示，用相同注脚表示同极性端子，当只需标出相对极性关系时，也可在同极性端子上标以“*”，电压互感器一、二次绕组各电量的正方向习惯上与电流互感器相同。从图 1-5 可见，在不计互感器的误差，并将各电气量归算至同一侧时， U_1 与 U_2 大小相等、方向相同，故接在二次侧的负载 Z_L 犹如接在一次系统中一样，非常直观。

(二) 电压互感器的接线方式

测量仪表和继电器，有时要求接入相电压，有时要求接入线电压，所以电压互感器根

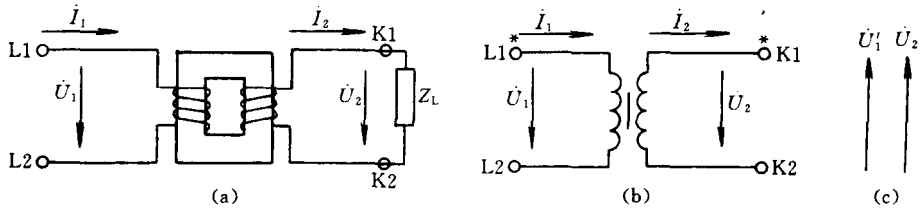


图 1-5 电压互感器的极性标注及相量图

据不同的要求而有不同的接线，常用接线方式有如下几种。

1. 星形接线

这种接线可由三个单相电压互感器或一个三相电压互感器构成。用三个单相电压互感器构成的星形接线如图 1-6 所示，其一、二次绕组的三个末端分别接在一起，并在同一点接地，一次绕组的中性点接地可使电压互感器正确地反映出系统相对地电压，二次绕组中性点接地，一方面可使接入的二次负载取得相对地的电压；另一方面是保安接地。

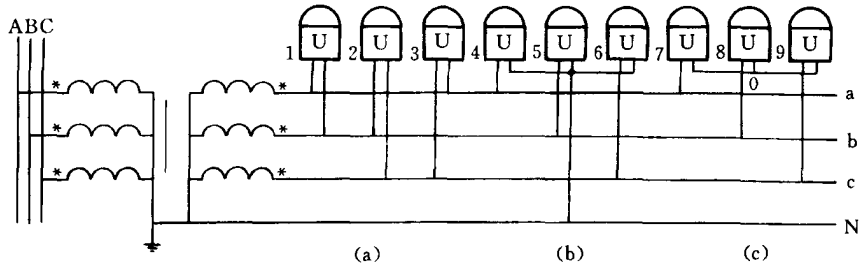


图 1-6 电压互感器的星形接线

在图 1-6 中二次负载可以接相间电压或相对地电压，也可以接相对系统中性点的相电压，在后一种情况下应把三个阻抗相等的继电器接成星形，其中性点 O 不要与电压互感器二次侧的中性点相连，如图 1-6 中的 7、8、9 继电器，O 点位于三个线电压组成的三角形之重心上，其相量如图 1-7 所示。每个继电器线圈上的电压为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{a0} &= (\dot{U}_{ab} - \dot{U}_{ca})/3 \\ \dot{U}_{b0} &= (\dot{U}_{bc} - \dot{U}_{ab})/3 \\ \dot{U}_{c0} &= (\dot{U}_{ca} - \dot{U}_{bc})/3 \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

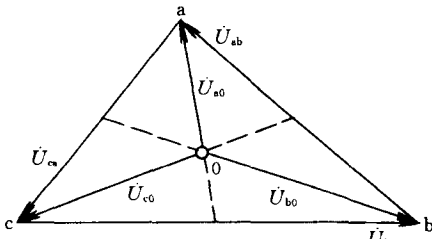


图 1-7 相对系统中性点的相电压

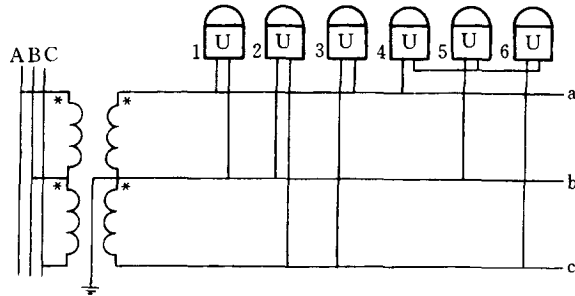


图 1-8 两个单相电压互感器的不完全星形接线

2. 不完全星形接线

由两台单相电压互感器组成不完全星形（V—V）接线，如图 1-8 所示。电压互感器的一次绕组不允许接地，二次绕组采用 b 相接地，作为保安接地。这种接线只用两只电压互感器就可取得三相的相间电压，和相对系统中性点的相电压。它不能取得相对地电压，可广泛用于中性点不直接接地系统。

第二节 测量变换器

整流型和晶体管型继电保护中，常常需要将互感器二次侧的电流、电压按一定比例线性地变换成交流电压，这就需要采用测量变换器。它包括电压变换器 TV、电流变换器 TA 和电抗变换器 UR，其原理接线如图 1-9 所示。

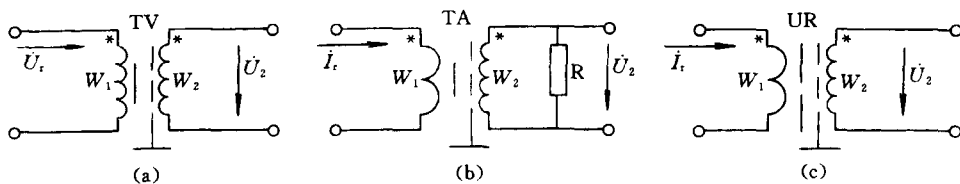


图 1-9 测量变换器原理图

测量变换器在保护中的作用是：按照保护构成原理的要求，进行电气量的变换与综合，同时它还起着隔离的作用。三种变换器都是具有铁心的电感元件，可以用图 1-10 所示的 T 型等值电路表示。图中 E_s 和 Z_s 分别为等效电源的电势和内阻抗， Z'_1 和 Z_2 分别为变换器一、二次线圈的漏阻抗， Z_c 为励磁阻抗， Z_L 为变换器所接的负荷阻抗，但工作特性有很大差异，分述如下。

一、电压变换器

电压变换器的铁心不带气隙，励磁阻抗很大，TV 的一次绕组接电压互感器的二次侧，因 TV 的一次侧是电压源， $Z_s=0$ ，TV 的二次侧接继电器电压回路，等值阻抗很大，因此 $Z_L \gg Z_s$ 、 $Z_c \gg Z_s$ 。这样 TV 相当于小电压互感器，当输入电压为 U 时，在二次侧得到的电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= K_{iv} \dot{U}_1 \\ K_{iv} &= W_2/W_1 \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中 K_{iv} ——TV 的变换系数。

输入量与输出量的相位相同，二次侧可视为恒压源。

二、电流变换器

电流变换器的铁心没有气隙，励磁阻抗很大，TA 的一次线圈串接在电流互感器的二次侧，是电流源， Z_s 极大，二次侧并联一个阻值不大的电阻 R ， Z_L 很小，在铁心不饱和时 I_1 和一、二次绕组的漏阻抗均可忽略，故 $Z_L \ll Z_s$ 、 $Z_L \ll Z_c$ ，相当于小电流互感器。当一次侧

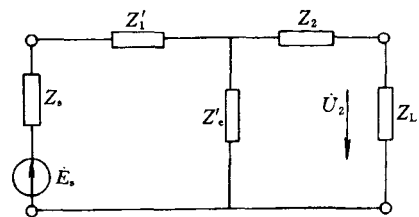


图 1-10 测量变换器的等值电路

加入由电流互感器来的电流 I_r 时，二次电压可写成

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= W_1/W_2 RI_r = K_{ta}R\dot{I}_r \\ K_{ta} &= W_1/W_2 \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中 K_{ta} ——电流变换器的变换系数、实数。

输入量与输出量的相位相同，二次侧可视为恒流源。为保证测量的精确度，TA 的铁心不能工作在饱和状态，所以 TA 二次侧并联的电阻要小，否则， R 过大，二次绕组感应电势增大，铁心易于饱和，但也不能过小，否则要得到同样的 U_2 需较大的 I_r ，使保护的灵敏度降低。

三、电抗变换器

有附加线圈的电抗变换器是介于电流互感器和电压互感器之间的一种特殊变压器，其等值电路与变压器的等值电路相似。但是在结构上，铁心具有气隙，一次绕组 W_1 加入交流电流 I_r ，二次侧通常有两个绕组，一个绕组 W_2 用作输出电压 U_2 ，另一个绕组 W_3 接入可调电阻 R_ϕ ，用以调节输出电压与输入电流之间的相位。原理接线图如图 1-11 所示。

1. 电抗变换器二次侧不接附加线圈

为了使问题简化，假定 W_3 绕组开路。铁心具有气隙，励磁阻抗很小，在工作电流范围内铁心不会磁化饱和，从而使 UR 的二次侧输出电压与一次侧输入电流保持线性比例关系的范围加大。在使用中，二次负载 Z_L 很大，所以 $Z_L \gg Z'$ ，相当于变压器工作在开路状态。又因为铁心损耗和一、二次绕组的漏抗都很小，则等值电路可简化成如图 1-12 所示。于是，一次电流 I_r 流过 Z'_c ，后在其两端产生的压降就是电抗变换器的输出电压 U_2 。

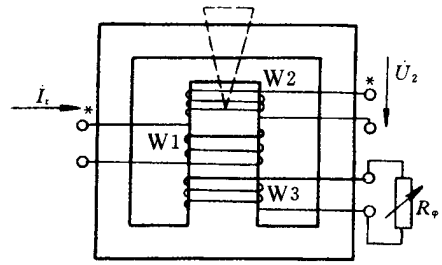


图 1-11 电抗变换器 UR 的原理接线图

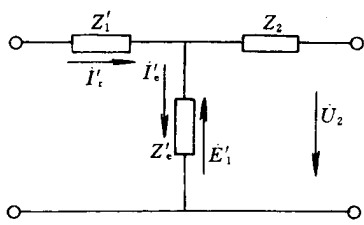


图 1-12 UR 的简化等值电路

按等值电路图 1-12 可作出 UR 相量图，先画出铁心磁通 Φ 的相量，根据楞次定律 E_2 超前 $\Phi 90^\circ$ 相位，于是可画出 $E_2 = U_2$ 的相量，由于 Z'_c 很小，一次电流 I_r 全部作为励磁电流 $I_r = I_c$ ，它分为两部分，其中 I_{ca} 为有功分量，用于铁心损耗，与 E_2 同相， I_{cr} 为无功分量，产生磁通 Φ 。从相量图看出， U_2

比 I_r 超前的角度略小于 90° (如略去 I_{ca} 则 U_2 比 I_r 超前 90°) 这个关系可以表示为：

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_r Z'_c = \dot{I}_r Z'_c W_1/W_2 = K_{ur} \dot{I}_r \quad (1-8)$$

式中 K_{ur} ——一个具有阻抗量纲的复数，又称 UR 的转移阻抗，当铁心不饱和时为一常数。

2. 电抗变换器接有附加绕组

在应用中，为了模拟电流在被保护线路阻抗上的压降，就需要根据被保护线路阻抗角的不同调整 K_{ur} 的阻抗角，所以要引入 W_3 绕组，并接入电阻 R_ϕ 来实现 (图 1-13)。若略去一、二次绕组的漏抗，等值电路及相量图如图 1-14 所示。在 W_3 回路中产生的电流 I_ϕ 落后

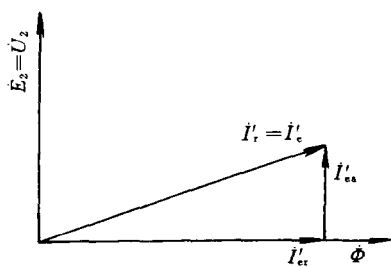


图 1-13 无 W3 绕组时 UR 的相量图

U_2 一个角度，这个角度决定于绕组 W_3 和 R_φ 回路的阻抗角。一次电流 $I'_r = I'_c + I'_\varphi$ 从相量图 1-14 看出 U_2 超前 I'_r 的角度较开路时小，也就是 K_{ur} 的阻抗角减小。所以用电阻 R_φ 即可调节 K_{ur} 的阻抗角 φ ，适当选择阻抗角，能使继电器工作在最灵敏状态。但须注意，一次电流不变，当接入 R_φ 以后， I'_c 较开路时小，则磁通值减小，于是，二次侧电压 U_2 下降。

3. 铁心磁化曲线对电抗变换器工作的影响

铁心磁化曲线的特性如图 1-15 (a) 所示，磁化曲线

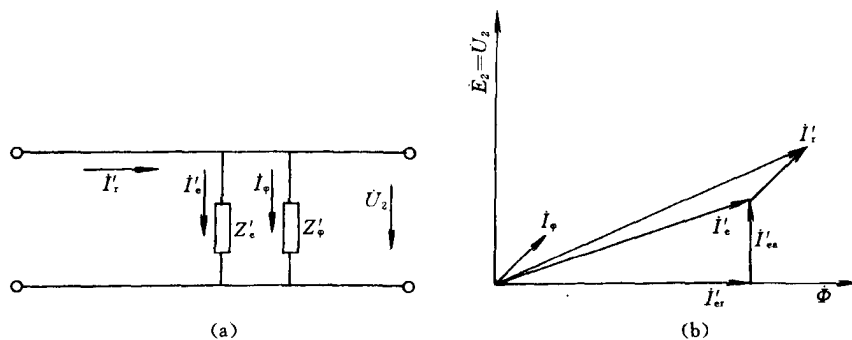


图 1-14 说明 W_3 起移相作用的等值电路及相量图

的起始段比较平缓，在磁势足够大时，磁化曲线又进入饱和段，在这两段内，导磁率较低，单位电流在二次侧感应的电势较小，即 K_{ur} 值较小，只有在磁化曲线的中间直线段，导磁率最高， K_{ur} 值不变且最大。 K_{ur} 随加入电流 I_r 的变化曲线如图 1-15 (b) 曲线 1 所示，为消除铁心饱和的影响，可在铁心中留有气隙，在选取电抗变换器的参数时，应考虑一次安匝与气隙的长度配合，以便当加入最大电流时，铁心不饱和。

为消除磁化曲线起始部分导磁率较低的影响，可在气隙中插入一片楔形的坡莫合金片进行补偿。这是因为坡莫合金的磁化曲线的根部呈直线状，如图 1-15 (c) 所示。也就是小电流时具有很高的导磁率，而大电流时能很快饱和，因此，在小电流时它能发挥作用，减

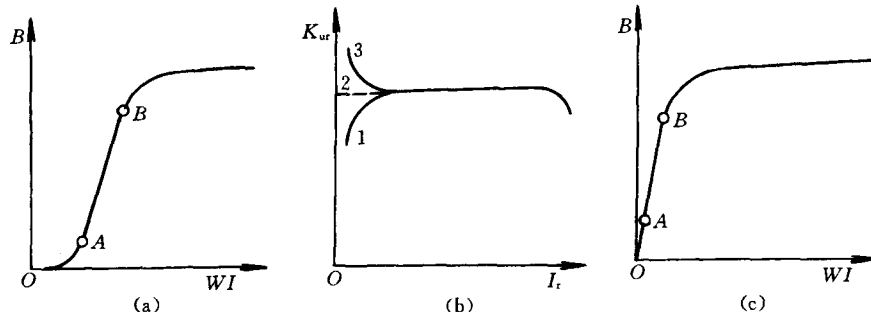


图 1-15 电磁关系示意图

(a) 铁心磁化曲线；(b) $K_{ur} = f(I_r)$ 的关系曲线；(c) 坡莫合金的磁化曲线

小了气隙的磁阻，提高了原有铁心的导磁率。而在大电流时，合金迅速饱和，不起补偿作用。补偿以后， I_r 与 K_{ur} 的关系可调整到如图 1-15 (b) 曲线 2、3 所示那样，曲线 2 做到了完全补偿，曲线 3 则过补偿。

4. 系统频率变化对电抗变换器的影响

从电流互感器得到的二次电流 I_r 加到电抗变换器的原边，则在铁心中产生磁通，二次侧感应电势，其大小为

$$E_2 = 4.44fW_2\Phi_m \quad (1-9)$$

E_2 与系统频率 f 成正比，因此，UR 可抑制直流分量而放大高频分量。

第三节 对称分量过滤器

任何不对称的三相系统按照一定的换算关系都可分解为三个对称的三相系统，即正序、负序和零序系统。电力系统正常运行时，一般三相是对称的，只存在正序分量；发生不对称短路时，会出现负序分量；发生接地故障时，总会出现零序分量。所以，在保护中，采用由负序、零序或复合过滤器构成的保护装置。由于只反应在故障情况下才出现的零序、负序分量，既能满足灵敏性和选择性的要求，又可简化接线，提高保护装置的可靠性。

某种相序过滤器是一种从三相正弦电压或电流中过滤出正序、负序、零序量的装置，当输入端加入三相正弦电压或电流时，输出端即可得到与输入量中某一相序分量成比例的电压或电流。

一、零序电压过滤器

零序电压获取的方法通常有四种。

(1) 利用三相五柱式电压互感器二次开口三角形侧获取零序电压，接线如图 1-16 所示。对于三相对称的正序或负序电压，三相的相量和为零，其输出电压为零。当系统中出现零序电压时，其输出电压

$$\begin{aligned} \dot{U}_{mn0} &= \dot{U}_{a0} + \dot{U}_{b0} + \dot{U}_{c0} \\ &= (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) / n_{TV} \\ &= 3\dot{U}_0 / n_{TV} \end{aligned} \quad (1-10)$$

有零序电压存在时，互感器铁心的三根芯柱中的磁通相位相同，它们的合成磁通经两根边柱构成通路。而在三相三柱式电压互感器中就没有铁心柱作为零序磁通的回路，这样，零序磁通只能通过气隙和电压互感器的外壳构成回路。由于磁阻很大，致使零序励磁阻抗很小，零序励磁电流很大，使误差增大，而且可能因发热而损坏互感器。在系统正常运行或发生相间短路时，从理论上讲，开口三角形的输出电压为零，实际上是有不平衡电压输出。这是因为电压互感器本身有误差；一次系统三相对地不平衡及存在三次及三的倍数次谐波电压等原因。

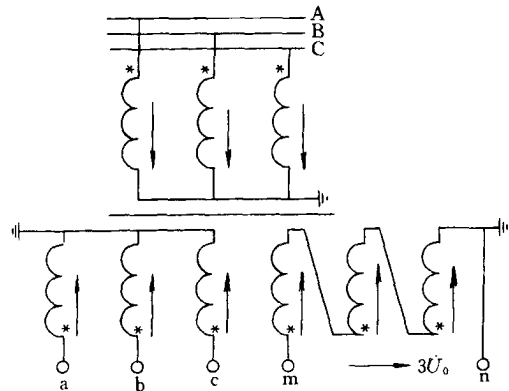


图 1-16 三相五柱式电压互感器的开口三角形接线方式