

# 第一章 绪 论

## 第一节 电力系统继电保护的作用

### 一、电力系统的故障和不正常运行状态及引起的后果

在电力系统中，由于雷击或鸟兽跨接电气设备、设备制造上的缺陷、设计和安装的错误、检修质量不高或运行维护不当等原因，往往发生各种事故。最常见的同时也是最危险的故障是各种形式的短路。其中以单相接地短路最为常见，而三相短路是比较少见的。此外，输电线路有时可能发生断线故障或几种故障同时发生的复合故障。

发生故障可能引起的后果是：

- (1) 故障点通过很大的短路电流和所燃起的电弧，使故障设备烧坏。
- (2) 系统中设备，在通过短路电流时所产生的热和电动力使设备缩短使用寿命。
- (3) 因电压降低，破坏用户工作的稳定性或影响产品质量。
- (4) 破坏系统并列运行的稳定性，产生振荡，甚至使整个系统瓦解。

最常见的不正常工作状态是过负荷。所谓过负荷就是电气设备的负荷电流超过了额定电流。此外，发电机有功功率不足所引起的频率降低，水轮发电机突然甩负荷所引起的过电压，系统发生振荡等都属于不正常运行状态。

由于过负荷，加速了设备绝缘材料的老化和损坏，甚至引起事故扩大造成严重故障。总之，不正常工作状态往往影响电能的质量、设备的寿命、用户生产产品的质量等。

### 二、继电保护装置及其任务

为防止电力系统中发生事故一般采取如下对策：

(1) 改进设计制造，加强维护检修，提高运行水平和工作质量。采取各项积极措施消除或减少发生故障的可能性。

(2) 一旦发生故障，迅速而有选择地切除故障元件，保证无故障部分正常运行。

继电保护装置，就是指反应电力系统中电气元件发生故障或不正常运行状态，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) 发生故障时，自动、迅速、有选择地将故障元件（设备）从电力系统中切除，使非故障部分继续运行。

(2) 对不正常运行状态 为保证选择性，一般要求保护经过一定的延时 并根据运行维护条件（如有无经常值班人员）而动作于发出信号（减负荷或跳闸）且能与自动重合闸相配合。

## 第二节 继电保护的基本原理和保护装置的组成

### 一、继电保护的基本原理

继电保护的原理是利用被保护线路或设备故障前后某些突变的物理量为信息量，当突

变量达到一定值时，起动逻辑控制环节，发出相应的跳闸脉冲或信号。

### 1. 利用基本电气参数的区别

发生短路后，利用电流、电压、线路测量阻抗等的变化，可以构成如下保护。

(1) 过电流保护。反映电流的增大而动作，如图 1-1 所示，若在 BC 段上发生三相短路，则从电源到短路点 d 之间均将流过很大的短路电流  $I_d$ ，可以使保护 2 反映这个电流而动作于跳闸。

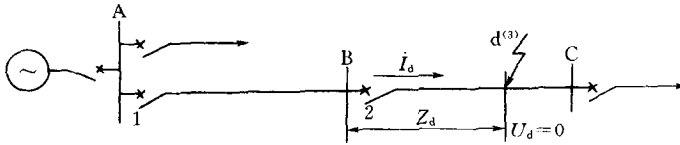


图 1-1 单侧电源线路

(2) 低电压保护。反应于电压的降低而动作，如图 1-1，短路点 D 的电压  $U_d$  降到零，各变电所母线上的电压都有所下降，可以使保护 2 反应于这个下降的电压而动作。

(3) 距离保护（或低阻抗保护）。反应于短路点到保护安装地之间的距离（或测量阻抗的减小）而动作。在图 1-1 中，设以  $Z_d$  表示短路点到保护 2（即变电所 B 母线）之间的阻抗，则母线上的残余电压为  $U_{(B)} = I_d Z_d$ 。即  $Z_d$  就是在线路始端的测量阻抗，它的大小正比于短路点到保护 2 之间的距离。

### 2. 利用内部故障和外部故障时被保护元件两侧电流相位（或功率方向）的差别

如图 1-2 所示双侧电源网络。我们统一规定电流的正方向是从母线流向线路。现在来分析被保护的元件线路 AB 的各种情况。

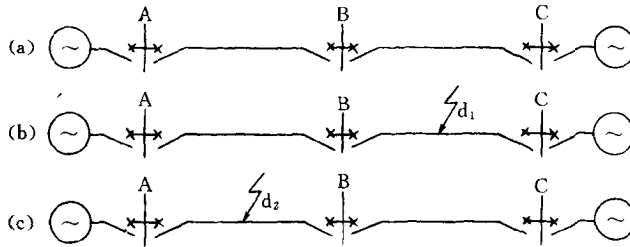


图 1-2 双侧电源网络

(a) 正常运行情况；(b) 线路 AB 外部短路情况；(c) 线路 AB 内部短路情况

正常运行时，A、B 两侧电流的大小相等相位相差  $180^\circ$ ；当线路 AB 外部故障时，A、B 两侧电流仍大小相等，相位相差  $180^\circ$ ；当线路 AB 内部短路时，A、B 两侧电流一般大小不相等，在理想情况下（两侧电势同相位且全系统的阻抗角相等），两电流同相位。从而可以利用电气元件在内部故障与外部故障（包括正常运行情况）时，两侧电流相位或功率方向的差别可以构成各种差动原理的保护（内部故障时保护动作），如纵联差动保护，相差高频保护、方向高频保护等。

### 3. 对称分量是否出现

电气元件在正常运行（或发生对称短路）时，负序分量和零序分量为零；在发生不对

称短路时，一般负序和零序都较大。因此，根据这些分量的是否存在可以构成零序保护和负序保护。此种保护装置都具有良好的选择性和灵敏性。

#### 4. 反应非电气量的保护

反应变压器油箱内部故障时所产生的气体而构成瓦斯保护；反应于电动机绕组的温度升高而构成过负荷保护等。

### 二、继电保护装置的组成

继电保护的种类虽然很多，但是在一般情况下，都是由三个部分组成的，即测量部分、逻辑部分和执行部分，其原理结构如图 1-3 所示。

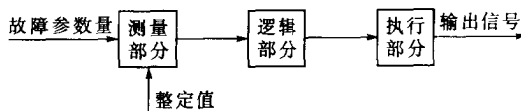


图 1-3 继电保护装置的原理结构图

#### 1. 测量部分

测量部分是测量被保护元件工作状态（正常工作、非正常工作或故障状态）的一个或几个物理量，并和已给的整定值进行比较，从而判断保护是否应该起动。

#### 2 逻辑部分

逻辑部分的作用是根据测量部分各输出量的大小、性质、出现的顺序或它们的组合，使保护装置按一定的逻辑程序工作，最后传到执行部分。

#### 3. 执行部分

执行部分的作用是根据逻辑部分送的信号，最后完成保护装置所担负的任务。如发出信号，跳闸或不动作等。

## 第三节 对继电保护的要求

对电力系统继电保护的基本性能要求是有选择性，速动性，灵敏性，可靠性。这些要求之间，有的相辅相成，有的相互制约，需要针对不同的使用条件，分别地进行协调。

### 一、选择性

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，以保证系统中的无故障部分仍能继续安全运行。如图 1-4 所示的网络接线中，当  $d_1$  点短路时，首先应由距离短路点最近的保护 3 动作跳闸，将故障线路 CD 切除，而变电所 ABC 继续供电。而不是由保护 1 或 2 首先动作跳闸，中断变电所 BCD 的供电，造成大面积停电。

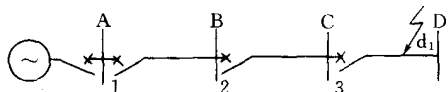


图 1-4 有选择性动作的说明

在要求继电保护动作有选择性的同时，还必须考虑继电保护或断路器有拒绝动作的可能性。如 1-4 图  $d_1$  点短路时，应该保护 3 动作，但由于某种原因，该处的继电保护或断路器拒绝动作时，此时如前一条线路 BC 的保护 2 动作，故障也可消除（使停电范围不致过大），线路 BC 的保护又称为相邻元件（下一条线路 CD）的后备保护。由于这个保护 2 相对于线路 CD 是在远处实现的，因此又称为远后备保护。

在复杂的高压电网中，当实现远后备保护有困难时，在每一元件上应装设单独的主保护和后备保护。如在线路 CD 上装设两套保护。当主保护拒绝动作时，由后备保护动作，由于这种后备保护是在主保护同一处实现的因此称它为近后备保护。

## 二、速动性

短路时快速切除故障，可以缩小故障范围，减轻短路引起的破坏程度，减小对用户工作的影响，提高电力系统的稳定性。因此，在发生故障时，应力求保护装置能迅速动作切除故障。

由于速动性与选择性在一般情况下是矛盾的，为兼顾两者，一般允许保护带有一定的延时切除故障。故障切除的总时间等于保护装置和断路器动作时间之和。对于不同的电压等级和不同结构的网络，故障切除的最小时间有不同的要求。一般对 400~500kV 以上的网络，约为 0.02~0.04s，对 220~230kV 的网络为 0.04~0.1s；对 110kV 的网络为 0.1~0.7s。对配电网，切除短路的最小时间取决于不允许电压长时间降低的用户，一般为 0.5~1.0s

有些故障不仅要满足选择性的要求，同时要求快速切除故障。例如：

- (1) 为保证系统稳定性，必须快速切除高压输电线路上的故障。
- (2) 发电厂或重要用户的母线电压低于允许值（一般 0.6 倍额定电压）的故障。
- (3) 大容量的发电机，变压器及电动机内部发生的故障。
- (4) 1~10kV 线路导线截面过小，不允许延时切除的故障。

## 三、灵敏性

是指对保护范围内发生故障或不正常运行状态的反应能力。满足要求的保护装置是在规定的保护范围内故障时，无论短路点的位置以及短路的类型如何，都能敏锐感觉，正确反应。保护装置的灵敏性，通常用灵敏系数来衡量，灵敏系数越大，则保护的灵敏度就越高，反之就越低。关于灵敏系数的求取方法在第二章详细介绍。

## 四、可靠性

是指在规定的保护范围内发生了属于它应该动作的故障时，它不应该拒绝动作，而在其他不属于它应该动作的情况下，则不应该误动作。

保证继电保护装置能有足够的可靠性，应注意如下几点：

- (1) 选用质量好，结构简单，工作可靠的继电器和元件。
- (2) 设计接线时，力求简单，使用继电器和继电器触点最少。
- (3) 正确选定继电保护的整定值。
- (4) 对保护装置要提高安装和调整试验的质量，加强经常的维护管理。

以上四个基本要求是分析研究继电保护的基础，也是贯穿全课程的一个基本线索。根据被保护元件在电力系统中的地位和作用来确定具体的保护方式，以满足其相应的要求。

## 第四节 继电保护技术的发展简史

继电保护的发展是随着电力系统和自动化技术的发展而发展的。几十年来，随着我国电力系统向高电压、大机组、现代化大电网发展，继电保护技术及其装置应用水平获得很

大提高。在 20 世纪 50 年代及以前，差不多都是用电磁型的机械元件构成。随着半导体器件的发展，陆续推广了利用整流二极管构成的整流型元件和由半导体分立元件组成的装置。70 年代以后，利用集成电路构成的装置在电力系统继电保护中得到广泛运用。到 80 年代，微型机在安全自动装置和继电保护装置中逐渐应用。随着新技术、新工艺的采用，继电保护硬件设备的可靠性、运行维护方便性也不断得到提高。继电保护技术将达到更高的水平。

#### 复 习 思 考 题

1. 在电力系统中继电保护的任务是什么？
2. 继电保护的基本原理有哪些？都是怎样构成的？
3. 电力系统对继电保护的基本要求是什么？什么叫选择性、速动性、灵敏性和可靠性？
4. 继电保护装置由哪几部分组成？各部分的作用是什么？

## 第二章 电网的电流保护

输电线路发生短路故障时，电流突然增大，利用电流突然增大来使继电器动作而构成的保护装置，称为电流保护。电流保护在 35kV 及以下的电网中广泛采用。对于更高电压的网络，在能满足系统对保护装置的基本要求时，也可以考虑电流保护。只有当不满足要求时，才进一步考虑采用其它性能较好的保护。

### 第一节 单侧电源电网相间短路的电流保护

#### 一、电磁型继电器

电磁型继电器在 35kV 及以下电网的电力线路和电气设备继电保护装置中大量地被采用，电流继电器是实现电流保护的基本元件。电磁型继电器基本结构型式有螺管线圈式、吸引衔铁式和转动舌片式三种，如图 2-1 所示。

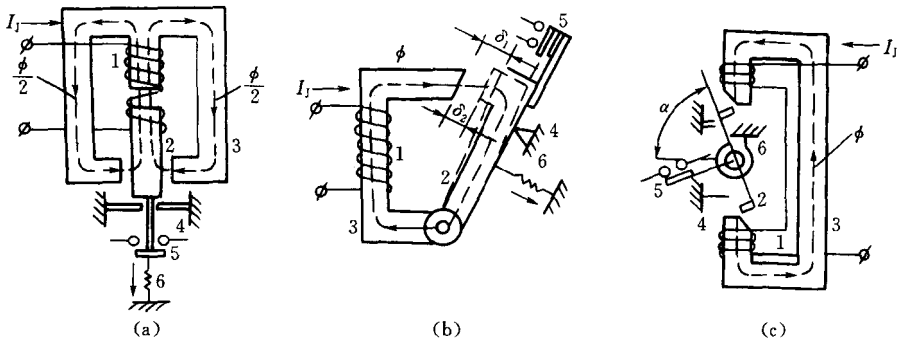


图 2-1 电磁型继电器的原理结构

(a) 螺管线圈式；(b) 吸引衔铁式；(c) 转动舌片式

1—线圈；2—可动衔铁；3—电磁铁；4—止档；5—接点；6—反作用弹簧

电流继电器在电流保护中用作测量和起动元件，它是反应电流超过某一整定值而动作的继电器。电磁型继电器是利用电磁原理工作的，现以吸引衔铁式继电器为例进行分析，如图 2-2 所示。

首先分析使继电器触点接通的力矩（即动作力矩）。在线圈 1 中通以电流  $I_J$ ，则产生与其成正比的磁通  $\Phi$ ，即  $\Phi \propto \frac{I_J}{\delta}$ （注： $\Phi = \frac{N_J I_J}{R_m}$ ； $R_m = \frac{\delta}{\mu_0 S}$ ），通过由铁芯、空气隙和可动舌片而成的磁路，使舌片磁化与铁芯的磁极产生电磁吸力，其大小与  $\Phi^2$  成正比，这样由电磁吸引力作用到舌片上的电磁转矩  $M_{dc}$  可表示为

$$M_{dc} = K_1 \Phi^2 = K_2 \frac{I_J^2}{\delta^2} \quad (2-1)$$

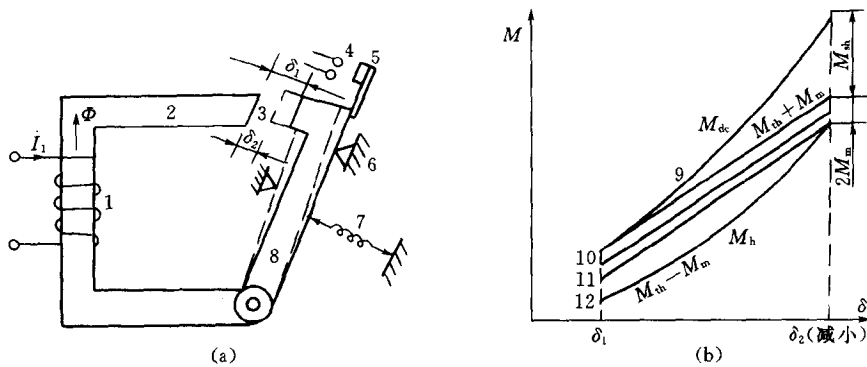


图 2-2 电磁型电流继电器的原理结构和转矩曲线

(a) 原理结构图；(b) 电磁转矩与反作用转矩与舌片行程的关系

- 1—线圈；2—铁芯；3—空气隙；4—固定触点；5—可动触点；6—止档；7—弹簧；  
8—被吸引的可动舌片；9—起动电磁转矩；10—起动时的反作用转矩；  
11—返回时的反作用转矩；12—返回时的电磁转矩

式中  $K_1$ 、 $K_2$ ——比例常数；

$\delta$ ——电磁铁与可动铁芯之间的气隙。

其次分析使继电器触点闭合的阻力矩。正常工作情况下，线圈中流入负荷电流，继电器不工作，这是由于弹簧对应于空气隙长度  $\delta_1$  产生一初始力矩  $M_{th1}$ 。由于弹簧的张力与伸长量成正比，因此，当空气隙长度由  $\delta_1$  减小到  $\delta_2$  时，弹簧产生的反抗力矩为

$$M_{th} = M_{th1} + K_3(\delta_1 - \delta_2)$$

式中  $K_3$ ——比例常数。

另外，在可动舌片转动的过程中，还必须克服摩擦力矩  $M_m$ ，其值可以认为是不随  $\delta$  变化的一个常数。因此，阻碍继电器动作的全部机械反抗力矩为

$$M_{th} + M_m$$

(1) 继电器动作的条件。为使继电器动作，必须增大电流  $I_j$ ，通过增大电流  $I_j$  来增大电磁转矩  $M_{dc}$ ，使其满足关系式：

$$M_{dc} \geq M_{th} + M_m$$

这是继电器能够动作的条件。

(2) 动作电流。能够满足上述条件，使继电器动作的最小电流值  $I_j$ ，称为继电器的动作电流（起动电流），记作  $I_{dzj}$ 。对应此时的电磁转矩为

$$M_{dc} = K_2 \frac{I_{dzj}^2}{\delta^2}$$

在图 2-2 (b) 中表示出了可动舌片由  $\delta_1$  减小到  $\delta_2$  时，电磁转矩  $M_{dc}$  和机械反抗力矩 ( $M_{th} + M_m$ ) 与  $\delta$  的关系曲线。前者以  $\delta$  的平方关系变化，后者按比例关系变化，分别为曲线 1 和 2，由此可知在触点闭合的  $\delta_2$  位置，将出现一个剩余力矩  $M_{sh}$ ，即电磁转矩与反抗力矩的差值，它对触点的可靠接触是有好处的。

(3) 继电器的返回条件。继电器动作后，当  $I_j$  减小时，继电器在弹簧的作用下将返回。为使继电器返回，弹簧的作用力矩  $M_{th}$  必须大于电磁力矩  $M_{dc}$  及摩擦力矩  $M_m$  之和，即

$$M_{th} \geq M_{dc} + M_m \quad \text{或} \quad M_{dc} = M_{th} - M_m$$

这就是继电器能够返回的条件。

(4) 返回电流。满足上述条件，使继电器返回原位的最大电流值称为继电器的返回电流，记为  $I_{hj}$  对应此时的电磁转矩为

$$M_h = K_2(I_{hj}^2/\delta^2) \quad (2-2)$$

在返回过程中，转矩  $M_h$  和  $(M_{th} - M_m)$  与  $\delta$  的关系如图 2-2 (b) 的曲线 3 和曲线 4

由前所述，当  $I_j < I_{dzj}$  时，继电器不动作，而当  $I_j \geq I_{dzj}$  时，则继电器迅速动作，触点闭合；当减小  $I_j$  使  $I_j = I_{hj}$  时，继电器又立即返回原位，触点打开。继电器的起动和返回特性称为“继电特性”。如图 2-3 所示。

(5) 返回系数。返回电流与起动电流的比值称为继电器的返回系数，可表示为

$$K_h = \frac{I_{hj}}{I_{dzj}}$$

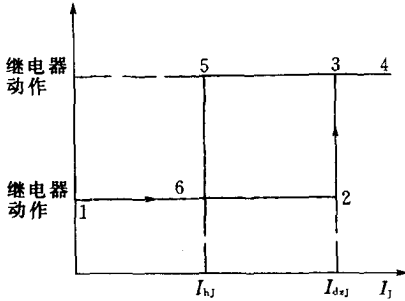


图 2-3 继电器的“继电特性”

由图 2-2 (b) 可看出， $M_h < M_{dz}$ ，两者之差与剩余力矩  $M_{sh}$  和摩擦力矩  $M_m$  有关，所以返回系数恒小于 1 (一切过量动作的继电器都如此)。在实际应用中，要求有较高的返回系数，如 0.85~0.9。返回系数越大，则保护装置的灵敏度越高，但过大的返回系数会使继电器触点闭合不够可靠。

提高返回系数的措施：采用坚硬的轴承以减小摩擦力矩  $M_m$ ；改善磁路结构以减小剩余力矩  $M_{sh}$ 。

(6) 动作电流的调整方法：

- 1) 改善继电器线圈的匝数；
- 2) 改变弹簧的张力；
- 3) 改变初始空气隙长度。

吸引衔铁式结构的继电器一般被用作中间继电器，如 DZ-10 系列。螺管线圈式结构继电器多被用作时间继电器，如 DS-100 系列。

## 二、晶体管型继电器

晶体管型继电器的功能是由晶体管开关电路完成的。

### 1. 晶体管型电流继电器

晶体管型电流继电器由电压形成回路——电流变换器 TA 将输入电流变换成与之成正比的电压；整流比较回路及执行回路——单稳态触发器构成。其接线如图 2-4 所示。

(1) 正常工作时：电流变换器的输入电流小于继电器的动作电流， $U_{R3} \approx 0$  晶体管  $VT_1$  因正向偏置而导通， $VT_2$  完全截止，输出电压  $U_{sc}$  接近于  $+E_1$ ，对应于继电器不动作状态。

(2) 起动时：当输入继电器的电流大于继电器的动作电流时， $U_{R3}$  增大，a 点电位降低，致使  $VD_5$  导通， $VT_1$  截止 其集电极电位升高 使晶体管  $VT_2$  导通，输出电压  $U_{sc}$  降至 0.1~0.3V，继电器处于动作状态。当继电器的输入电流减小至返回电流时， $U_{R3}$  减小，a 点电位增高使  $VD_5$  截止， $VT_1$  重新导通，触发器翻转，继电器返回，继电器的返回电流小于继

电压形成回路	整流滤波回路	比较回路	执行回路 (单稳触发器)	输出
--------	--------	------	-----------------	----

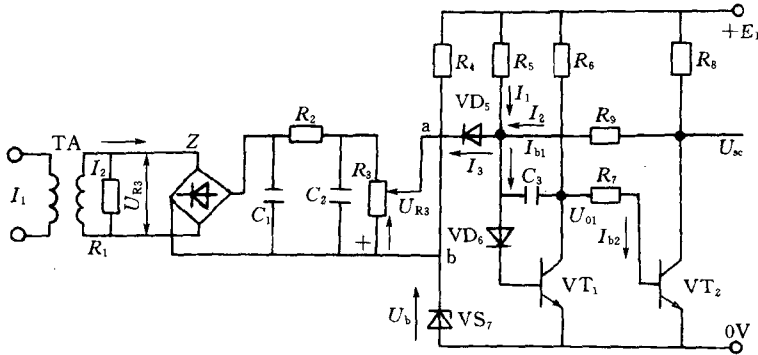


图 2-4 晶体管型过电流继电器的原理接线图

电器的动作电流，其返回系数小于 1。

## 2. 晶体管型时间继电器

晶体管型时间继电器由两个三极管及阻容延时电路组成。其原理接线如图 2-5 所示。

在正常情况下， $VT_3$  饱和导通，电容器  $C$  被短接，电容器  $C$  上的电压为  $VT_3$  集电极与发射极之间的饱和压降  $U_{ces1}$  和二极管  $VD_8$  的正向压降  $U_D$  之和为

$$U_{CD} = U_D + U_{ces1} \approx 0.6 + 0.2 = 0.8 \text{ (V)}$$

其值小于稳压管  $VS_9$  的方向击穿电压， $VT_4$  截止，输出电压  $U_{sc}$  近于  $0V$ ，表示继电器延时输出，延时时间  $t$  可按下式计算

$$t = R_2 C \ln \frac{E_C - U_{CD}}{E_C - U_{VS}} \quad (2-3)$$

式中  $U_{CD}$ ——电容器  $C$  上的起始电压；

$E_C$ ——电源电势；

$U_{VS}$ ——稳压管反向击穿电压。

由上式可见，改变继电器的延时  $t$  可调节电阻  $R_2$  或电容  $C$  的值。一般采用调节  $R_2$  的值来改变时间继电器的延时  $t$ 。

## 三、电流互感器

电流互感器的作用是将高压设备中的额定大电流变换成  $5A$  或  $1A$  的小电流，以便继电保护装置或仪表用于测量电流。电流互感器由铁芯及绕组组成。按常规，电压、电动势及电流的正方向如图 2-6 所示。一次绕组中电流  $I_1$  在一次绕组中产生磁势  $I_1 W_1$  形成铁芯中的磁通  $\Phi$ ，在一、二次绕组中感应反电势  $E_1$  及  $E_2$ 。二次绕组中的电势  $E_2$  在二次绕组回路中产生电流  $I_2$ 。二次绕组工作在短路条件下，一、二次绕组磁势有以下平衡关系为

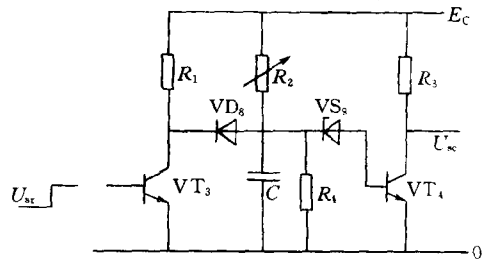


图 2-5 晶体管时间继电器原理接线图

$$I_1 W_1 - I_2 W_2 = 0; \quad I_2 = \frac{W_1}{W_2} I_1$$

式中  $W_1$ 、 $W_2$ ——电流互感器一、二次绕组的匝数。

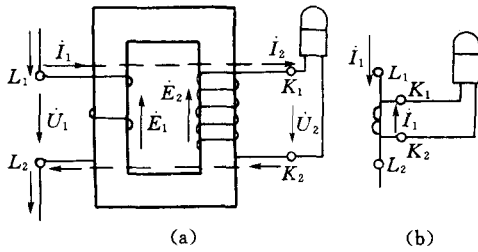


图 2-6 电流互感器  
(a) 原理图；(b) 示意图

### 1. 电流互感器的极性

在图 2-6 (a) 中，一、二次绕组中感应电势  $E_1$  及  $E_2$  同时为高电位点，称同极性或对应端。一般用  $L_1$ 、 $K_1$  表示或以“\*”标注。当一次绕组中的电流由  $L_1$  或“\*”流入时，二次绕组中的电流由  $K_1$  或“\*”流出，这种标注方式称为减极性标注。

### 2. 电流互感器的等值电路及相量图

电流互感器与普通变压器的等值电路有着相同的形式。由于电流互感器是在二次绕组短路情况下工作的，二次绕组电压只有几伏，铁芯中的磁感应强度很小，一般只有 0.1T 左右。由于工作在磁化曲线较低的直线部分，所以励磁阻抗  $|X_{1c}| \gg |Z_f|$ ，其等值电路如图 2-7 (a) 所示，图中原边的参数都已归算到二次绕组。

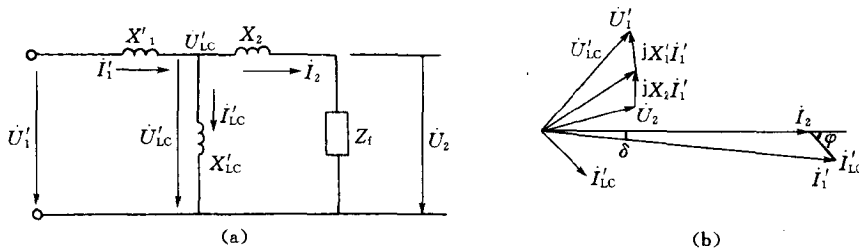


图 2-7 电流互感器的等值回路及相量图  
(a) 等值电路；(b) 相量图

电流互感器的相量图以二次电流  $I_2$  为基准，可求得  $U_2 = I_2 Z_f$  及  $U_{LC} = U_2 + jI_2 X_2$ ，在已知  $X'_{LC}$  时，可求得

$$I_{LC} = \frac{U'_{LC}}{jX'_{LC}}$$

则

$$I'_{1} = I'_{2} + I'_{LC}$$

式中  $I_{LC}$ ——电流互感器的励磁电流。

### 3. 误差分析

(1) 电流误差。归算到二次绕组的一次绕组一次电流  $I'_{1}$  与二次绕组电流  $I_2$  的数量差，一般用百分数表示，即

$$\Delta I \% = \frac{I'_{1} - I_2}{I'_{1}} \times 100\%$$

由向量图可知，当  $\delta$  角比较小时  $\Delta I \% = \frac{I'_{LC} \cos \varphi}{I'_{1}} \times 100\%$

而

$$\dot{I}_{LC} = \frac{\dot{I}_2(jX_2 + Z_f)}{jX'_{LC}} = f\left(\frac{Z_f}{X'_{LC}}\right)$$

由此可见，电流互感器在正常运行时，电流误差决定于励磁电流  $I'_{LC}$  的大小，而励磁电流与电流互感器的负载阻抗  $Z_f$  成正比，与励磁阻抗  $X'_{LC}$  成反比。一般误差小于 1%。

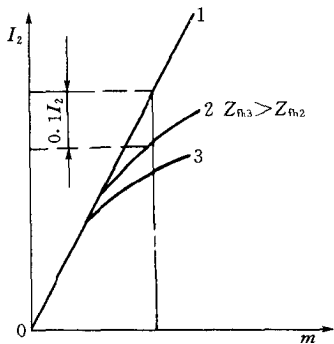


图 2-8 电流互感器  $I_2 = f(m)$  的关系

(2) 稳态短路电流引起的误差。当电流互感器原边流过大的短路电流时，尽管二次有很大的去磁安匝，由于二次负载压降加大，二次电压  $U_2$  仍会升高，即铁芯中磁感应强度大大增加，以至铁芯饱和，磁阻增加，励磁阻抗  $X'_{LC}$  下降，励磁电流增加，二次侧电流将减小且波形发生变化。电流互感器二次侧与一次侧电流的关系如图 2-8 所示。图中横坐标表示电流互感器一次侧通入短路电流  $I_d$  与额定电流  $I$  之比，以  $m$  表示。纵坐标为二次电流。在铁芯未饱和时，二次侧电流与原边电流成正比增加，如图 2-8 中曲线 2 所示。若电流互感器二次负载阻抗  $Z_f$  较大，铁芯饱和更快。电流互感器

原副边电流的关系将如图 2-8 中的曲线 3 所示。

电流互感器稳态运行时的电流误差实际是二次负载阻抗  $Z_f$  与短路电流倍数  $m$  的函数，可表示为

$$\Delta I\% = f(Z_f, m)$$

式中  $m$ ——短路电流倍数， $m = \frac{I_d}{I_{c,1}}$ ；

$I_d$ ——流过电流互感器原边的短路电流；

$I_{c,1}$ ——电流互感器的一次额定电流。

按规定用于继电保护的电流互感器，其稳态电流误差不允许大于 10%，角误差不得大于 7°（角误差  $\delta$  为电流互感器原副边电流的相位差），即

$$f(Z_f, m) \leq 10\%$$

在满足 10% 误差的条件下， $m = f'(Z_f)$  的关系曲线叫电流互感器的 10% 误差曲线，它由厂家提供。例如 LGC 型的电流互感器的 10% 误差曲线如图 2-9 所示。在已知流过电流互感器的最大短路电流倍数  $m$  时，通过查该电流误差不超过 10% 的副边最大允许负载阻抗  $Z_f$ ，也就是按 10% 误差核校的二次负载阻抗。

(3) 暂态短路电流引起的误差。假设电流互感器磁路不饱和，将原边向副边归算。接线如图 2-10 (a) 所示。当在 d 点发生短路时，电流互感器的原边流有短路电流的周期分量  $I_{d,z}$  和非周期分量  $I_{d,t}$ 。周期分量电流使电流互感器产生小于 10% 的误差  $I_{2f}$ ，如图 2-10 (b) 所示。原边突变的非周期分量  $I_1$  在副边引起突变的非周期分量  $I_{2t}$ 。由于原边短路回路的衰减时间常数一般约为  $t \approx 0.05s$ ；互感器副边匝数多，电感量大，衰减时间常数约为  $t_2 \approx 1s$ 。

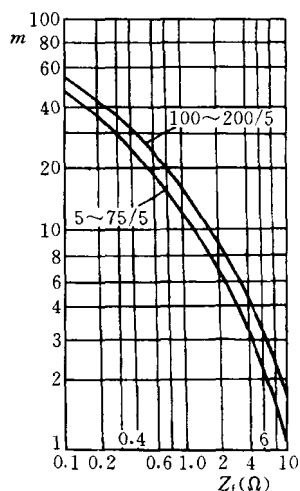


图 2-9 LGC 型电流互感器 10% 误差曲线

非周期分量的误差如图 2-10 (b) 所示,  $i_{nl} = i'_{1t} + i_{2t}$ 。当原边衰减完以后, 只剩下副边的非周期分量电流, 全部为非周期分量电流误差, 又由于非周期分量误差电流使铁芯饱和, 互感器励磁阻抗  $X'_{LC}$  下降, 使周期分量电流误差加大, 总误差电流如图 2-10 (b) 中的  $i_{tc}$ 。从误差曲线可以看出, 最大误差发生在短路后 3~5 个周波, 短路回路非周期电流衰减以后, 其值比稳态短路误差大许多倍, 且含有很大的直流成分。

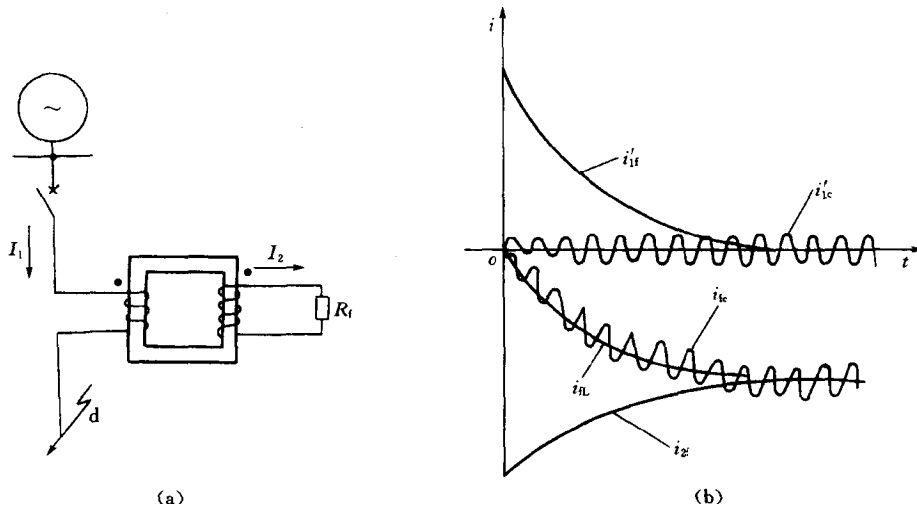


图 2-10 电流互感器暂态误差分析  
(a) 电流互感器接线图; (b) 电流互感器暂态误差曲线

(4) 减小电流互感器误差的措施。要减小电流互感器的误差就必须减小电流互感器的励磁电流。从制造角度看, 应尽量加大电流互感器的励磁电抗  $X_{LC}$ , 增大铁芯截面或用高导磁率的铍莫合金做铁芯。从使用角度看, 应尽量减小电流互感器的二次侧负载阻抗  $Z_f$ , 降低励磁电压  $U_{LC}$ ; 选择同型号的电流互感器串联使用, 使每个电流互感器的励磁电压仅为负载电压降的一半; 选择大变比的电流互感器, 以降低短路电流倍数。

顺便指出电流互感器为恒流源, 其输出阻抗接近无穷大 (一般约为  $20k\Omega$ )。互感器副边不应开路, 否则将产生 1000 V 以上的高电压。在副边不接负载时应将它短路。其副边必须接地, 以免高低压损坏时危及人身及设备的安全。

#### 四、电压互感器

电压互感器的任务是将很高的电压准确地变换至二次保护及二次仪表的允许电压, 使继电器和仪表既能在低电压情况下工作, 又能准确地反映电力系统中高压设备的运行情况。电压互感器分为电磁式和电容式两种。

##### 1. 电磁式电压互感器

(1) 工作原理。电磁式电压互感器的工作原理与一般电力变压器相似。主要差别是二者的任务不同和功率水平不同。前者要求准确地反映电压的变化, 因此要求电压损耗小, 以保证其准确性; 同时变送的功率很小。后者要求将某一电压等级的大功率电能变为另一电压等级的同样功率的电能, 因此要求在变换过程中能量损耗尽量小, 对电压损耗的要求较

低。电磁式电压互感器的等值电路与相量图如图 2-11 所示。以副边电压  $U_2$  为参考相量 依次画出各支路的电流及各节点电压的相量如图 2-11 (b) 所示。

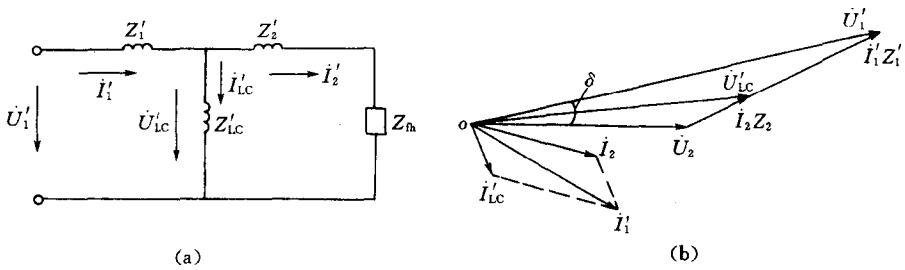


图 2-11 电压互感器的等值电路及相量图

(a) 等值电路；(b) 相量图

(2) 电压误差分析。电压互感器的电压误差是指归算到副边的原边电压  $U'_1$  与副边实际电压  $U_2$  的数量差，用百分数表示

$$\Delta U \% = \frac{U'_1 - U_2}{U'_1} \times 100 \%$$

当原副边电压的相角差  $\delta$  较小时，其电压误差可近似为

$$\begin{aligned} \Delta U \% &= \frac{I_2 Z_2 + I'_1 Z'_1}{U'_1} \times 100 \% \\ &= \frac{I_2 Z_2 + I_2 Z'_1 + I'_{LC} Z'_1}{U'_1} \times 100 \% \end{aligned}$$

从上式可看出，电压互感器的误差是由电压互感器的阻抗压降引起的。减小负载电流能提高电压互感器的精确度。

## 2. 电容式电压互感器

电容式电压互感器是利用电容分压原理实现电压变换的。最简单的电容式电压互感器如图 2-12 所示。 $C_1$ 、 $C_2$  为分压电容，T 为隔离变压器。二次开路时的电压  $\dot{U}_{20}$  为

$$\dot{U}_{20} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \dot{U}_1$$

由图 2-12 (b) 等值电路并根据戴维南定理可知，有载时的输出电压为

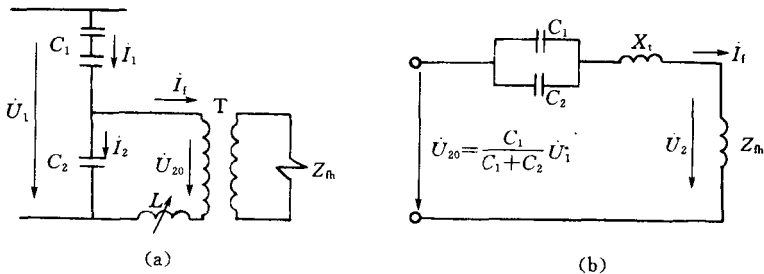


图 2-12 电容式电压互感器原理图

(a) 原理图；(b) 等值电路

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{20} - jI_t X_L + \frac{\dot{I}_t}{j\omega(C_1 + C_2)} = \dot{U}_{20} - \dot{I}_t \left[ jX_L - \frac{1}{j\omega(C_1 + C_2)} \right]$$

$X_L$  为隔离变压器漏抗与调节电抗  $X_L$  之和。调节  $X_L$ ，使  $jX_L = -j \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)}$

则  $U_2 = U_{20}$

利用可调电感  $L$  补偿分压器容性电抗，大大降低电压互感器总电抗，使电压互感器更接近理想恒压源。提高了电压互感器的精确度。

### 五、无时限电流速断保护（电流 I 段）

在满足可靠性和保证选择性的前提下，当所在线路保护范围内发生短路时，反应电流增大而能瞬时动作切除故障的电流保护，称为电流速断保护也称为无时限电流速断保护。

#### 1. 几个基本概念

(1) 系统最大运行方式与系统最小运行方式。所谓最大运行方式就是在被保护线路末端发生短路时，系统等值阻抗最小，而通过保护装置的短路电流为最大的运行方式。最小运行方式就是在同样短路条件下，系统等值阻抗最大，而通过保护装置的短路电流为最小的运行方式。系统等值阻抗的大小与投入运行的电气设备及线路的多少等有关。

(2) 最小短路电流与最大短路电流。由于在相同条件下，两相短路电流  $I_d^{(2)}$  是三相短路电流  $I_d^{(3)}$  的  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  倍。因此有  $I_d^{(2)} < I_d^{(3)}$ ，对某一保护而言，在最大运行方式下三相短路时，通过保护装置的短路电流为最大，称之为最大短路电流。而在最小运行方式下两相短路时，通过保护装置的短路电流为最小，称之为最小短路电流。

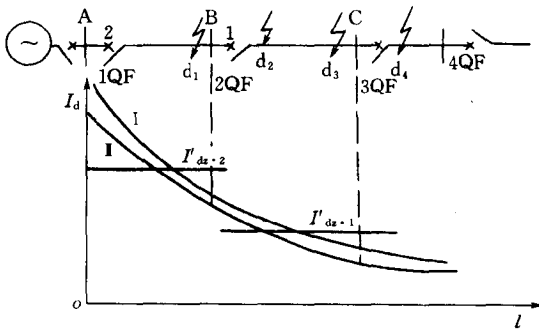


图 2-13 电流速断保护动作特性分析

(3) 保护装置的起动值。对应与电流升高而动作的电流保护来讲，使保护装置起动的最小电流值称为保护装置的起动电流，记作  $I_{dz \cdot bh}$ ，保护装置的起动值是用电力系统一次侧的参数表示的，当一次侧的电路电流  $I_d$  达到这个数值时，安装在该处的这套保护装置就能够起动。

(4) 保护装置的整定。所谓整定就是根据对继电保护的基本要求，确定保护装置起动值（一般情况下是指电力系统一次侧的参数），灵敏系数，动作时限等过程。

#### 2. 工作原理

无时限电流速断保护为了保证其保护的选择性，一般情况下速断保护只保护被保护线路的一部分，具体工作原理如图 2-13 所示。

对于单侧电源供电线路，在每回线路的电源侧均装有电流速断保护。在输电线路发生短路时，流过保护安装地点的短路电流可用下式计算

$$I_{d \cdot \max}^{(3)} = \frac{E_x}{X_{s \cdot \min} + X_1 l} \quad (2-4)$$

$$I_{d \cdot \min}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{E_x}{X_{s \cdot \max} + X_1 L} \quad (2-5)$$

式中  $I_{d \cdot \max}^{(3)}$ ——最大三相短路电流；  
 $I_{d \cdot \min}^{(2)}$ ——最小两相短路电流；  
 $E_x$ ——电源等值计算相电势；  
 $X_{s \cdot \min}$ ——从保护安装地点到电源的最小等值电抗；  
 $X_{s \cdot \max}$ ——从保护安装地点到电源的最大等值电抗；  
 $X_1$ ——输电线路单位长度的正序电抗；  
 $L$ ——短路点至保护安装地点的距离。

由式(2-4)和式(2-5)可看出，流过保护安装地点的短路电流值随短路点的位置变化，且与系统的运行方式和短路类型有关。 $I_{d \cdot \max}^{(3)}$ 和 $I_{d \cdot \min}^{(2)}$ 与 $L$ 的关系如图2-13中的曲线I和II所示。从图可看出，短路点距保护安装地点愈远，流过保护安装地点的短路电流愈小。

### 3. 整定计算

(1) 动作电流。为保证选择性，保护装置的起动电流应按躲开下一条线路出口处（如D2点即B变电所）短路时，通过保护的最大短路电流（最大运行方式下的三相短路电流）来整定。即

$$I_{dz} > I_{d \cdot D2 \cdot \max} = K_K I_{d \cdot B \cdot \max}$$

从而保证了在D<sub>2</sub>点发生各种短路时，保护2都不动作。引入可靠系数 $K'_K = 1.2 \sim 1.3$ ，目的是：考虑存在的各种误差；实际短路电流要大于理论计算值；考虑必要的裕度。所以对保护2来讲，起动电流 $I'_{dz \cdot 2} = K'_K I_{d \cdot B \cdot \max}^{(3)}$ 同理对保护1有

$$I'_{dz \cdot 1} = K'_K I_{d \cdot c \cdot \max}^{(3)} \quad (2-6)$$

把起动电流标于图2-13中，可见在交点M至保护2安装处的一段线路上短路对保护2能够动作。在交点M以后的线路上短路时，保护2不动作。因此，一般情况下，电流速断保护只能保护本条线路的一部分，而不能保护全线路，其最大和最小保护范围 $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ 。

(2) 保护范围（灵敏度 $K_{Lm}$ ）计算（校验）。有关规程规定，在最小运行方式下，速断保护范围的相对值 $L_b \% > (15\% \sim 20\%)$ 时，为合乎要求，即

$$L_b \% = \frac{L_{\min}}{L_{AB}} \times 100\% \geq (15\% \sim 20\%)$$

当系统为最大运行方式三相短路时保护范围最大，当系统最小运行方式二相短路时保护范围最小，求保护范围时考虑后者。由图2-13可知

$$I'_{dz} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{E_x}{X_{s \cdot \max} + X_d} \quad (2-7)$$

其中 $X_d = X_1 L_{\min}$ 代入式(2-7)整理得

$$L_{\min} = \frac{1}{X_1} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{E_x}{I'_{dz}} - X_{s \cdot \max} \right) = \frac{1}{X_1} \left( \frac{U_e}{2I'_{dz}} - X_{s \cdot \max} \right) \quad (2-8)$$

式中 $U_e$ ——输电线路的额定线电压；

$L_{AB}$ ——被保护线路的总长度。

(3) 动作时限。无时限电流速断保护没有人为延时，只考虑继电器固有动作时间，考虑到线路中管型避雷器放电时间为  $0.04 \sim 0.06s$ ，在避雷器放电时速断保护不应该动作，为此在速断保护装置中加装一个保护出口中间继电器。一方面扩大接点的容量和数量，另一方面躲过管型避雷器的放电时间，防止误动作。由于动作时间较小可认为  $t=0s$ 。

#### 4. 电流速断保护的接线图

(1) 单相原理接线图。电流速断保护的单相原理接线如图 2-14 所示，电流继电器接于电流互感器 TA 的二次侧，它动作后起中间继电器，其触点闭合后，经信号继电器发出信号和接通断路器跳闸线圈跳。

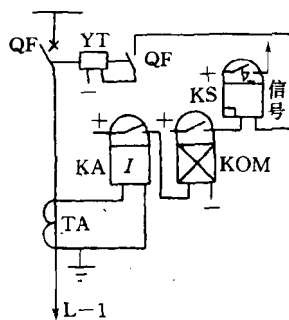


图 2-14 单相原理接线图

(2) 展开图。交流回路和直流回路如图 2-15 所示。展开图结构简单，便于理解，对复杂回路的设计，安装和调试带来许多方便。

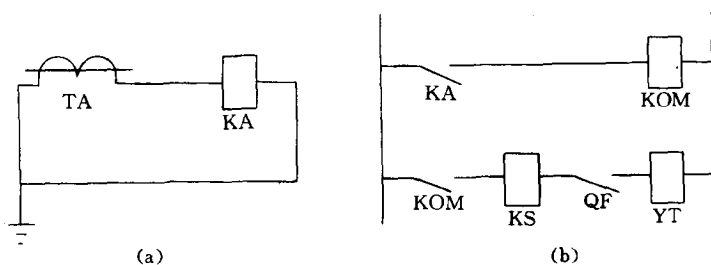


图 2-15 速断保护装置接线展开图

(a) 交流回路；(b) 直流回路

#### 5. 对电流速断保护的评价

优点：是简单可靠，动作迅速。

缺点：不能保护线路全长。运行方式变化较大时，可能无保护范围。如图 2-16 所示，在最大运行方式下整定后，在最小运行方式下无保护范围。在线路较短时，可能无保护范围。如图 2-17 所示，线路短则  $I_d$  变化平缓，整定时考虑了可靠系数后，在最小运行方式下保护范围小甚至等于零。

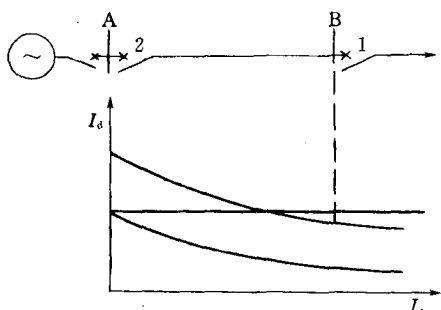


图 2-16 系统运行方式变化较大情况

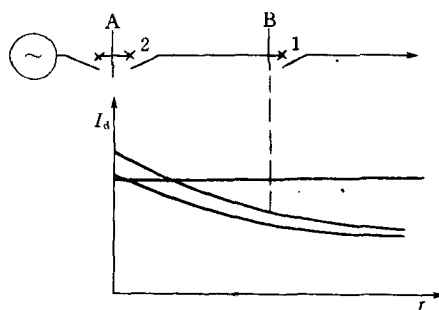


图 2-17 短路时保护范围较小的情况

在特殊情况下，电流速断可以保护线路全长。在采用线路—变压器组的接线方式的电网中，把线路和变压器看成是一个元件，如图 2-18 所示。速断保护按躲开变压器低压侧短路出口处  $d_1$  点短路来整定，由于变压器的阻抗一般较大，因此，保护的起动电流大为减小，以至保护线路的全长。

### 六、限时电流速断保护（电流 II 段）

无时限电流速断保护在许多情况下用于任何复杂网络均能保证选择性，且接线简单，动作迅速可靠。但是电流速断保护不能保护本线路的全长，因此必须增设一套新的保护，用来切除本线路上电流速断保护范围以外的故障。作为无时限电流速断保护的后备保护，这就是限时电流速断保护。

#### 1. 工作原理

(1) 为了保护本条线路全长，限时电流速断保护的保护范围必须延伸到下一条线路中去，这样当下一条线路出口处短路时，它就能切除故障。如图 2-19 所示。

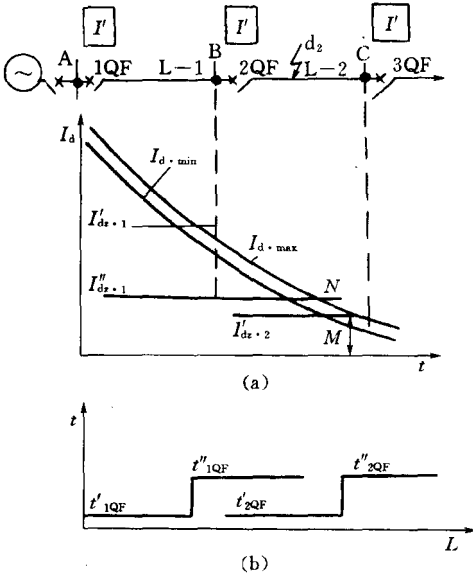


图 2-19 限时电流速断动作特性分析

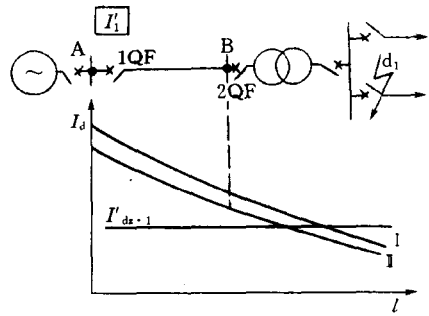


图 2-18 用于线路—变压器组的电流速断保护

(2) 为了保证选择性，就必须使限时电流速断保护的动作用带有一定的时限。如图 2-19， $d_2$  点处于保护 2 的电流速断和保护 1 的限时电流速断保护范围以内，当  $d_2$  点短路时，为了先让保护 2 去动作，就必须让保护 1 的限时电流速断保护延时动作，以防保护 1 拒动时保护 2 动作。

(3) 为了保证速动性，时限应尽量缩短。时限的大小与延伸的范围有关，为使时限最小，使限时电流速断的保护范围不超出下一条线路无时限电流速断保护的的范围。因而动作时限  $t''$  比下一条线路的速断保护时限  $t'$  高出一个时间阶段  $\Delta t$ 。即限时电流速断在时间上躲过电流速断的动作。

#### 2. 整定计算

(1) 动作电流。动作电流  $I''_{dz}$  按躲开下一条线路无时限电流速断保护的的动作电流进行整定

$$I''_{dz} = K''_K I'_{dz \text{ 下—线}}$$

式中  $I'_{dz \text{ 下—线}}$  —— 下一条相邻线路无时限电流速断保护的的动作电流；

$K''_K$  —— 可靠系数，一般取 1.1~1.2；

$I''_{dz}$  —— 本条线路限时电流速断保护的的动作电流。

(2) 动作时限。为了保证选择性，限时电流速断保护比下一条线路无时限电流速断保护的的动作时限高出一个时间阶段  $\Delta t$ ，即