

1 绪 论

1.1 继电保护的基本知识

1.1.1 短路故障

电力系统是由发电机、变压器、输电线路及许多电气设备组成的庞大而复杂的网络。构成网络的大量元件，一方面要经常受到自然环境的影响，例如冰雪、风雨、雷电、飞鸟等自然环境的影响；另一方面，这些设备在制造、安装和检修过程中，难免遗留下某些隐患，以及在运行过程中产生的绝缘老化、值班人员误操作等原因都可能影响其性能。由于上述原因，电力系统可能发生各种故障和出现不正常运行状态。

电力系统发生故障是指由于系统中某一元件的正常运行状态遭到破坏而无法正常工作的一种特殊状况。最常见也是最危险的故障是各种形式的短路故障，其中包括三相短路、两相短路、两相接地短路、不同地点的两点接地短路、单相接地短路，以及电机和变压器绕组的匝间短路等。除了短路故障外，还可能发生输电线路的断线故障，或在不同地点同时发生上述某几种故障的复故障。

短路故障将会引起下列严重后果：

(1) 短路点通过很大的短路电流，此电流形成的电弧有可能烧毁发生故障的元件。

(2) 短路电流通过其他非故障元件时，产生很大的热量和电动力，使这些元件的使用寿命缩短或使其损坏。

(3) 电力系统发生故障处附近的电压急剧下降，影响用户的正常用电。

(4) 使电力系统各发电厂之间并联运行的稳定性受到破坏，引起系统振荡，甚至可能使整个电力系统解列。

电力系统出现不正常运行状态，是指系统中电气元件的正常工作遭到破坏，但未发展成为故障时的情况。最常见的不正常运行状态是过负荷运行。电气设备长期过负荷运行，会加速设备的绝缘老化，或者损坏设备，严重时还可能发展成为故障。此外，系统的振荡、低频率运行等也属于不正常运行状态。

电力系统中的故障和不正常运行状态都可能引起系统事故。所谓系统事故，是指系统的全部或部分的正常运行状态遭到破坏，并由此造成对用户的供电中断，或

供电质量改变到不能容许的程度，甚至造成人身伤亡或设备损坏等。

电力系统是一个整体，系统中的各元件之间有着密切的联系，当某一个元件发生故障时，会立即影响到其他非故障元件的正常运行，使故障范围扩大，甚至可能发展成为严重的事故。因此，一旦发生故障，应迅速切除故障元件。切除故障元件的时间，常常要求小到十分之几秒，甚至百分之几秒。在这样短暂的时间内，由运行人员来发现故障元件，并将故障元件从电力系统中切除是不可能的，因此，目前普遍利用继电保护装置来完成这个任务。

1.1.2 继电保护的概念及任务

所谓“继电”，是指电路的相互更替和延续，利用电路的这种相互更替和延续而构成的电力系统的保护措施称为继电保护。

继电保护装置是指能够对电力系统元件故障和不正常运行状态作出反应，并能使断路器跳闸或发出信号的一种自动装置。这种装置的主要作用是：

(1) 当被保护元件发生故障时，能自动、迅速且有选择地借助断路器将故障元件从电力系统中切除，以保证系统的其他元件正常运行，并使故障元件免于继续遭受损坏。

(2) 感知电气元件的不正常运行状态，并根据运行维护的条件（如有无经常值班人员），而作出发出信号、减负荷或跳闸的反应。此时一般不要求保护迅速动作，而是根据电力系统及其元件的危害程度规定一定的延时，以免不必要的动作和由于干扰而引起的误动作。

(3) 与自动重合闸配合，恢复由于瞬时自消性故障引起的保护动作跳闸，迅速恢复供电，提高供电可靠性。

1.1.3 继电保护装置维护的基本知识

1. 物理环境

(1) 防止机械性撞击。

(2) 储存/工作于合适的环境温度或湿度中。

(3) 使用过程中要确保安装固定、牢靠，接线完整、牢靠。

2. 整定及校验

(1) 根据供电系统情况，计算机保护整定值，选择合适的继电保护装置。

(2) 根据产品使用说明书及注意事项，正确整定。

- (3) 根据继电保护试验的相关规程，定期对保护装置实行校验。
- (4) 做好事故后继电保护装置的校验工作。

1.1.4 继电保护装置维护的相关规程

与继电保护装置维护相关的规程很多，但其中最重要的是国标《继电保护和全自动装置技术规程》(GB14285—93)，该规程规定了电力系统继电保护和全自动装置的科研、设计、制造、施工及运行相关部门须共同遵守的基本原则。它适用于3 kV及以上电力系统中电力设备和线路的继电保护和全自动装置，是相关部门共同遵守的技术规程。

1.1.5 城轨供电系统继电保护作用

在城市轨道交通的运营中，供电一旦中断不仅会造成城市轨道交通的瘫痪，还会危及乘客生命安全和造成财产的损失。因此，高度安全、可靠而又经济合理的电力供给是城市轨道交通正常运营的重要保证和前提。

城市轨道交通供电系统作为电力系统的组成部分，一是为城市轨道交通列车提供牵引电能，二是为城市轨道交通车站提供动力照明电能。城轨供电系统由多个电气设备及传输线路组成，系统中各个电气设备及线路之间相互关联、相互影响。当系统中某个设备或者某条线路由于某种原因发生短路时，可能会对短路点附近的电气设备造成不能恢复的破坏，对非近端电气设备同样有损坏；也可能由于大电流产生的高热量而致使电气元件使用寿命缩短。这就要求在短路电流未达到稳态时，就

要切除对故障点的供电以消除短路电流。然而短路电流的上升时间只有短暂的几十到几百毫秒，显然通过人工操作的方式切除局部供电是不现实的，配置快速准确的继电保护装置意义重大。

城轨供电系统继电保护不仅具有快速解除短路故障危害的性能，还具有对各种故障隐患进行预防和识别的能力，是确保供电系统能够正常运行的重要部分，在城市轨道交通供电系统中占据着举足轻重的地位。

1.2 继电保护的原理与分类

1.2.1 继电保护的原理

为了完成继电保护装置的任务，继电保护装置必须做到：

- (1) 能正确区分被保护元件的工作状态。
- (2) 能正确识别是保护区内故障，还是保护区外故障。

为实现这两点，保护装置需要对电力系统发生故障前后电气物理量的特征变化进行识别。准确识别被保护设备的电气量在故障前后的突变信息，是继电保护装置的基本要求。

电力系统发生故障后，工频电气量变化的主要特征如下：

(1) 电流增大。短路时故障点与电源之间的电气设备和输电线路上的电流将急剧增加，大大超过正常运行时的负荷电流。

(2) 电压降低。当发生相间短路和接地短路故障时，系统各点的相间电压或相电压值下降，且越靠近短路点，电压越低。

(3) 电流与电压之间的相位角改变。正常运行时电流与电压间的相位角是负荷

的功率因数角，一般约为 20° ；三相短路时，电流与电压之间的相位角是由线路的阻抗角决定的，一般为 $60^\circ \sim 85^\circ$ ；而在保护反方向三相短路时，电流与电压之间的相位角则是 $180^\circ + (60^\circ \sim 85^\circ)$ 。

(4) 测量阻抗发生变化。测量阻抗的值为保护安装处电压与电流之比值。正常运行时，测量阻抗为负荷阻抗；金属性短路时，测量阻抗为线路阻抗。故障后测量阻抗显著减小，而阻抗角增大。不对称短路时，出现负序分量，如两相及单相接地短路时，出现负序电流和负序电压；单相接地时，出现负序和零序电流和电压分量。这些分量在正常运行时是不出现的。

继电保护就是以这些变化的物理量为基础，及时反应电力系统故障，根据反应物理量的不同，可构成以下各种不同类型的继电保护：

- (1) 反应电流变化，如电流速断、定时限过流、反时限过流及零序电流保护等。
- (2) 反应电压改变，如低电压保护和过电压保护。
- (3) 既反应电流又反应电流、电压间相位变化，如方向过流保护。
- (4) 反应电压与电流的比值，即反应故障点至保护安装处阻抗，如距离保护。
- (5) 反应输入电流、输出电流差，如差动保护。

如图 1-1 所示为牵引变电所 27.5 kV 馈线过电流保护原理图。它表明过电流保护装置由电流继电器 KA、时间继电器 KT、信号继电器 KS 组成，并通过电流互感器

TA 和断路器分闸线圈 YT 与主电路联系在一起。正常时，由于负荷电流经电流互感器变流后流入电流继电器线圈的电流值小于 KA 的动作值，所以各继电器均处于正常状态，常开触点断开。断路器处于合闸位置的动作状态，其常开辅助触点 QF₁ 闭合。

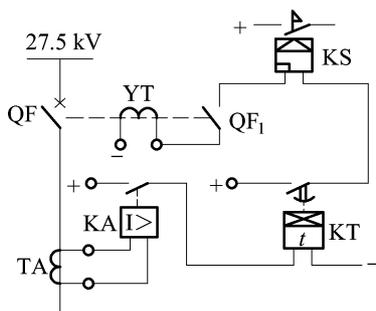


图 1-1 27.5 kV 馈线过电流保护原理图

当一次电路发生电路故障时，馈线电流增大，TA 的二次电流也随之增大。当二次电流增大至 KA 的整定动作值时，KA 动作，其常开触点闭合，接通了 KT 线圈的直流回路，其带时限的常开触点延时闭合，使直流电源的正极经 KT 的常开触点、KS 的线圈、断路器的常开辅助触点 QF₁、分闸线圈 YT 与直流电源的负极接通，分闸线圈 YT 受电，断路器 QF 操作机构动作，使断路器跳闸，自动切除故障线路。同时，信号继电器 KS 受电动作，其触点转换，发出分闸信号。

1.2.2 继电保护装置的构成

各种类型的继电保护，在组成上一般都具有测量部分、逻辑部分及执行部分等三部分，其组成框图如图 1-2 所示。

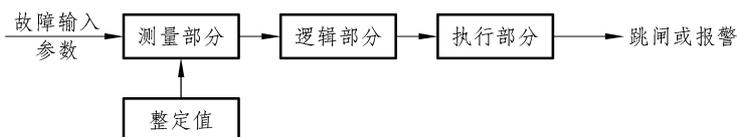


图 1-2 继电保护的系统组成框图

(1) 测量部分。它主要完成对被保护对象工作状态的一个或几个物理量的采集工作，并将采集结果与保护整定相比较，比较结果将用于下一步的逻辑运算。如根据比较结果，给出“是”“非”“大于”“不大于”等具有“0”或“1”性质的一组逻辑信号，从而判断保护是否应该启动。

(2) 逻辑部分。根据测量与整定的比较结果，由逻辑作出判断，以决定保护装置采取何种反应。如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，最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逻辑回路有“或”与“否”“延时启动”“延时返回”及“记忆”等回路。

(3) 执行部分。执行逻辑运算做出的决定，将逻辑运算结果通过电气执行回路完成报警、跳闸或保持不动作。如故障时，动作于跳闸；不正常运行时，发出信号；正常运行时，不动作等。

1.2.3 继电保护的分类

按照不同的原则，可以将继电保护分为不同的类型。

(1) 根据被保护对象不同，分为发电厂、变电所电气设备的继电保护和输电线路的继电保护。前者是指发电机、变压器、母线和电动机等元件的继电保护，简称

为元件保护；后者是指电力网及电力系统中输电线路的继电保护，简称线路保护。

(2) 根据保护反应物理量的不同，分为电流保护、电压保护、距离保护、差动保护和瓦斯保护等。

(3) 根据保护装置的组成元件不同，分为感应型、电磁型、晶体管型、集成电路型及微机型保护装置等。

(4) 按作用的不同，可分为主保护、后备保护和辅助保护。辅助保护是指为了补充主保护和后备保护的不足而增设的简单保护。

(5) 按操作电源性质的不同，可以分为直流操作电源保护和交流操作电源保护。

继电保护装置需有操作电源供给保护回路、断路器分合闸及信号等二次回路。因蓄电池是一种独立电源，工作可靠，通常在发电厂和变电所中，继电保护的操作电源是由蓄电池直流系统供电，其缺点是投资较大、维护麻烦。交流操作电源的投资少、维护简便但可靠性差，一般应用于中小型变电所，特别是农村小型变电所中。

1.3 对继电保护装置的基本要求

无论根据哪种原理构成的继电保护，在技术上都应满足四个基本要求，即选择性、速动性、灵敏性和可靠性。

1.3.1 选择性

选择性有两层含义：一是当电力系统某一元件发生故障时，电力系统中很大范围内的电气量都将发生变化，因此，位于此范围内的继电保护装置都有可能动作，这样势必造成大面积的停电。为了缩小电力系统的停电范围，要求保护装置只将发生故障的元件切除掉。二是当由于某种原因，距离短路点最近的保护装置或断路器

拒绝动作时，相邻元件的保护装置应起后备作用。

例如图 1-3 中，当 k_1 点发生短路故障时，应由故障线路上的保护 1 和保护 2 动作，将故障线路切除，这时变电所 B 则仍可由另一条非故障线路继续供电。当 k_3 点发生短路故障时，应由线路的保护 6 动作，使 6 处的断路器跳闸，将故障线 C-D 切除，这时只有变电所 D 停电。由此可见，继电保护有选择性的动作可将停电范围限制到最小，甚至可以做到不中断对用户的供电。

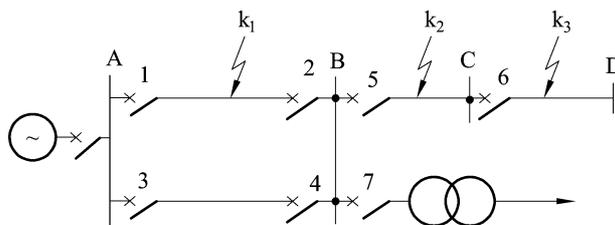


图 1-3 选择性动作说明图

当 k_3 点发生短路故障时，距短路点最近的保护 6 应动作切除故障，但由于某种原因，该处的保护或断路器拒动，故障便不能消除，此时，如其前一条线路（靠近电源侧）的保护 5 动作，故障也可消除，故将保护 5 称为保护 6 的后备保护。同理保护 1 和 3 应该作为保护 5 和 7 的后备保护。这种后备作用是通过相邻元件的保护装置，且在远处实现的，故称为远后备保护。一般情况下，远后备保护动作切除故障时将使供电中断的范围扩大。

在复杂的高压电网中，当实现远后备保护有困难时，也可采用近后备保护的方式。即当本元件的主保护拒绝动作时，由本元件的另一套保护作为后备保护。由于这种后备保护作用是在主保护安装处实现，所以称为近后备保护。

应当指出，远后备保护的性能是比较完善的，它对相邻元件的保护装置、断路器、二次回路和直流电源引起的拒绝动作，均起到后备作用，同时实现简单、经济。

因此在电压较低的线路上应优先采用，只有当远后备不能满足灵敏度和速动性的要求时，才考虑采用近后备的方式。

选择性是保证安全供电的基本条件之一，在设计保护方案与进行保护装置的整定计算时，必须首先满足选择性的要求。

1.3.2 速动性

速动性是指故障发生后，继电保护装置应能尽快地动作切除故障，以减少设备及用户在大电流、低电压状态下的运行时间，降低设备的损坏程度，提高系统并列运行的稳定性。动作迅速而又能满足选择性要求的保护装置，一般结构都比较复杂，价格昂贵，对大量的中、低压电力设备来说，不一定都有必要采用高速动作的保护。对保护速动性的要求应根据电力系统的接线和被保护设备的具体情况，经技术经济比较后确定。

一般必须快速切除的故障有以下几种：

- (1) 使发电厂或重要用户的母线电压低于有效值（一般为 0.7 倍额定电压）。
- (2) 大容量的发电机、变压器和电动机内部故障。
- (3) 中、低压线路导线截面过小，为避免过热不允许延时切除的故障。
- (4) 可能危及人身安全、对通信系统或轨道交通信号造成强烈干扰的故障。

在高压电网中，维持电力系统的暂态稳定性往往成为继电保护快速性的决定性因素，故障切除越快，暂态稳定极限（维持故障切除后系统的稳定性所允许的故障前输送功率）越高，越能发挥电网的输电效能。

故障切除时间包括保护装置和断路器动作时间，一般快速保护的动作为 $0.04 \sim 0.08 \text{ s}$ ，最快的可达 $0.01 \sim 0.04 \text{ s}$ ，一般断路器的跳闸时间为 $0.06 \sim 0.15 \text{ s}$ ，最快的可达 $0.02 \sim 0.06 \text{ s}$ 。

但应指出，要求保护切除故障达到最小时间并不是在任何情况下都是合理的，必须根据技术条件来确定。实际上对不同电压等级和不同结构的电网，切除故障的最小时间有不同的要求。例如，对于 35 ~ 60 kV 的配电网，一般为 0.5 ~ 0.7 s；对于 110 ~ 330 kV 的高压电网为 0.15 ~ 0.3 s；500 kV 及以上的超高压电网为 0.1 ~ 0.12 s。目前国产的继电保护装置，在一般情况下完全可以满足上述电网对快速切除故障的要求。

对于反应不正常运行情况的继电保护装置，一般不要求快速动作，而应按照选择性的条件，带延时地发出信号。

1.3.3 灵敏性

灵敏性是指电气设备或线路在被保护范围内发生短路故障或不正常运行情况时，保护装置的反应能力。能满足灵敏性要求的继电保护，在规定的范围内故障时，不论短路点的位置、短路的类型以及短路点是否有过渡电阻，都能正确反应动作。即要求在系统最大运行方式下发生三相短路时能可靠动作，在系统最小运行方式下发生经过较大的过渡电阻的两相或单相短路故障时也能可靠动作。

系统最大运行方式是指系统等效阻抗最小、被保护线路末端短路，通过保护装置的短路电流为最大的运行方式；系统最小运行方式就是在同样短路故障情况下，系统等效阻抗为最大，通过保护装置的短路电流为最小的运行方式。

保护装置的灵敏性通常用灵敏系数来衡量。灵敏系数用 K_{sen} 表示，计算方法如下。

(1) 对于反应故障参量增加的保护装置

$$K_{\text{sen}} = \frac{\text{保护区末端金属性短路时故障参数的最小计算值}}{\text{保护装置动作整定值}} \quad (1.1)$$

例如，反应相间短路的过电流保护的灵敏系数为

$$K_{\text{sen}} = \frac{I_{\text{k}\cdot\text{min}}^{(2)}}{I_{\text{act}}} \geq 1.5 \quad (1.2)$$

式中， $I_{\text{k}\cdot\text{min}}^{(2)}$ 为保护范围末端两相短路时的最小故障电流，单位为 A； I_{act} 为过电流保护的動作電流值，单位为 A。

(2) 对于反应故障参量降低的保护装置

$$K_{\text{sen}} = \frac{\text{保护装置动作整定值}}{\text{保护区末端金属性短路时故障参数的最大计算值}} \quad (1.3)$$

例如，反应电压降低而动作的低电压保护的灵敏系数为

$$K_{\text{sen}} = \frac{U_{\text{act}}}{U_{\text{k}\cdot\text{max}}} \geq 1.2 \quad (1.4)$$

式中， $U_{\text{k}\cdot\text{max}}$ 为保护范围末端短路时，保护安装处母线最大残余电压，单位为 V； U_{act} 为低电压保护的動作電壓值，单位为 V。

故障参数如电流、电压和阻抗等的计算，应根据实际可能的最不利的运行方式和故障类型来进行。

灵敏性增加，即增加了保护动作的信赖性，但有时与安全性相矛盾。对不同作用的保护及被保护的设备和线路，所要求的灵敏系数不同。

1.3.4 可靠性

可靠性是对继电保护最根本的要求，是指被保护范围内发生故障时，保护装置动作的可靠程度，即不误动、不拒动。不误动是要求继电保护在不需要它动作时可靠不动作，不拒动是要求继电保护在规定的保护范围内发生了应该动作的故障时可靠动作。

可靠性取决于保护的工作原理、装置本身的制造质量、保护回路的连接和运行维护的水平。一般而言，保护的工作原理越简单、保护装置的组成元件质量越高、回路接线越简单，保护的工作就越可靠。同时，正确的调试、整定、运行及维护，对于提高保护的可靠性都具有重要的作用。

继电保护的误动和拒动都会给电力系统带来严重危害。然而，提高不误动与提高不拒动的措施往往是矛盾的。由于不同的电力系统结构不同，电力元件在电力系统中的位置不同，误动和拒动的危害程度不同，所以提高可靠性的侧重点在不同的情况下有所不同。例如，对于母线保护，由于它的误动将会给电力系统带来严重后果，因此更强调不误动的安全性，一般是以两套保护出口触点串联后启动跳闸回路的方式。在城市轨道交通供电系统中，考虑到工作人员和乘客的安全，“宁误动不拒动”成为主要策略。

以上四个基本要求是设计、配置和维护继电保护的依据，又是分析评价继电保护的基础。这四个基本要求之间是相互联系的，但往往又存在着矛盾。因此在实际工作中，根据电网的结构和用户的性质，要辩证地进行统一。

1.4 继电保护的发展

继电保护技术是随着电力系统自动化技术的发展而发展的。

最早的继电保护，是当发生短路故障时，对反应线路电流增大的电流保护。通常采用的熔断器（保险丝）就是一种最简单的电流保护。但是，随着电力系统的发展，熔断器已远远不能满足电力系统保护的要求，而出现了继电器。继电器反应电流的变化，并使断路器跳闸，这就形成了所谓“继电保护”。

最早出现的继电器是安装于油断路器上直接反应一次短路电流，并作用于断路器的一次式电磁型过电流继电器。19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，出现了利用感应型电流继电器构成的过电流保护，1908年提出了以比较被保护线路两端电流为基础的电流差动保护。1910年起，开始采用方向电流保护，1920年初制成了距离保护装置。1927—1928年，开始出现利用被保护线路传递高频载波电流的高频保护。20世纪50年代，出现了利用故障点产生的行波实现快速继电保护的设

想，经过二十余年的研究，行波保护装置诞生。随着光纤通信在电力系统中的大量采用，利用光纤通道的继电保护得到了广泛应用。

在继电保护原理飞速发展的同时，构成继电保护装置的元件、材料、保护装置的结构形式和制造工艺也发生了巨大的变革，经历了机电式保护装置、静态保护装置和数字式保护装置三个发展阶段。

20 世纪 50 年代，随着晶体管的发展，出现了晶体管保护装置。这种保护装置体积小、动作速度快、无机械转动部分，经过二十余年的研究与实践，晶体管保护装置的抗干扰问题从理论到实际都得到了解决。20 世纪 70 年代，在我国大量采用晶体管保护。20 世纪 80 年代后期，静态继电保护装置由晶体管式向集成电路式过渡，后者成为静态继电保护的主要形式。

20 世纪 60 年代末，有人提出了用小型计算机实现继电保护的设想，但当时由于小型计算机价格昂贵，难于实际采用。随着微处理器技术的快速发展和价格的急剧下降，在 20 世纪 70 年代后期，便出现了性能比较完善的微机保护样机并投入运行。20 世纪 80 年代，微机保护在硬件和软件技术方面已趋于成熟。进入 90 年代，微机保护已在我国大量应用，微机型继电保护装置的主运算器由 8 位机、16 位机发展到数字信号处理器 (DSP)。这种由计算机技术构成的继电保护称为数字式继电保护。此外，由于计算机网络提供数据信息共享的优越性，微机保护可以占有全系统

的运行数据和信息，应用自适应原理和人工智能方法使保护原理、性能和可靠性得到进一步的发展和提高，使继电保护技术向着网络化、智能化、自适应和保护、测量、控制、数据通信于一体的方向不断发展。

复习思考题

1. 什么叫继电保护？继电保护的作用是什么？
2. 继电保护装置维护时整定及校验的内容是什么？最重要的规程是哪一个？
3. 电力系统发生故障时，工频电气量变化的主要特征有哪些？能构成哪些保护？
4. 以过电流保护为例，画出过电流保护的原理图，并说明其动作原理。
5. 继电保护装置由哪几部分组成？其作用是什么？
6. 试述对继电保护装置的要求。
7. 继电保护灵敏系数的定义是什么？
8. 什么是系统最大运行方式？什么是系统最小运行方式？

