

第一章 继电保护的基础知识

【学习目标】

- (1) 理解电力系统的运行状态。
- (2) 掌握继电保护的含义。
- (3) 理解继电保护的作用。
- (4) 了解继电保护的特点。
- (5) 掌握继电保护的工作原理。
- (6) 了解继电保护的分类。

第一节 继电保护的含义和作用

一、继电保护的含义

电力系统在运行中，可能出现各种故障和不正常运行状态，最常见同时也是最危险的故障是发生各种形式的短路。在发生短路时可能产生以下后果。

- (1) 通过故障点的短路电流很大或燃起电弧，使故障元件损坏。
- (2) 短路电流通过非故障元件，由于发热和电动力的作用，引起非故障元件的损坏或缩短它们的使用寿命。
- (3) 电力系统中部分地区的电压大大降低，破坏用户工作的稳定性或影响工厂产品的质量。
- (4) 破坏电力系统并列运行的稳定性，引起系统震荡，甚至使整个系统瓦解。

电力系统中电气元件的正常工作遭到破坏，但没有发生故障，这种情况属于不正常运行状态。例如，因负荷超过电气设备的额定值而引起的电流升高（又称过负荷），就是一种最常见的不正常运行状态。过负荷会使元件载流部分和绝缘材料的温度不断升高，加速绝缘的老

化和损坏，最后可能发展成故障。此外，系统中因功率缺额而引起的频率降低，发电机突然甩负荷而产生的内部过电压，以及电力系统发生震荡等，都属于不正常运行状态。

故障和不正常运行状态，都可能在电力系统中引起事故。事故，就是指系统或其中一部分的正常工作遭到破坏，并造成对用户少送电或电能质量变坏到不能容许的地步，甚至造成人身伤亡和电气设备损坏。

系统故障的发生，除了自然条件的因素（如遭受雷电等）之外，一般是由于设备制造上的缺陷、设计和安装的错误，检修质量不高或运行维护不当而引起的。在电力系统中，应采取各项积极措施消除或减少发生故障的可能性。故障一旦发生，必须迅速而有选择性地切除故障元件，这是保证电力系统安全运行的最有效的方法之一。

图 1-1 所示为某电气化铁道供电系统的简单示意图。T₁、T₂是牵引变电所内两台主变压器，用来将电源侧 110 kV 三相电压变换为 27.5 kV 单相电压向接触网供电，QF₁ ~ QF₈ 是高压断路器。

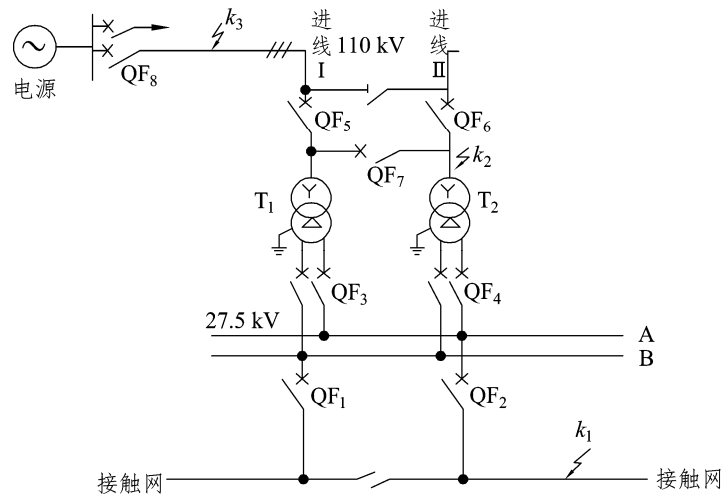


图 1-1 电气化铁道供电系统

高压断路器是用来带负荷操作断开和接通电路的高压开关电器。正常送电时，操作控制开关将断路器合闸。停电时，操作控制开关将断路器分闸。正常运行时，如果部分元件（如避雷器、隔离开关等异常接地等）或线路发生短路故障（如线路对地短路、线路间短路等），对应断路器应当自动跳闸，将短路故障切除。为了实现线路发生短路后，对应断路器能够自动跳闸，出现了一种自动化装置——继电保护装置，它不断测定供电系统运行中的状态，并将该测定值和预先整定好的基准值相比较，从而正确地判别系统是处于正常还是故障状态。当供电系统发生故障时，它按设计要求自动地发出指令，使与故障点直接有关的断路器跳闸并显示信号（有些情况下只发出信号）。继电保护装置是由各种继电器、电子元件与互感器等按一定要求组合而成的，切除故障的时间常常小到十分之几甚至百分之几秒。在电业部门常用“继电保护”一词泛指继电保护技术或由各种继电保护装置组成的继电保护系统，而“继

电保护装置”一词则指各种具体的装置。

二、继电保护的作用

继电保护装置是指能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。它的基本作用是：

(1) 自动、迅速、有选择性地故障部分（电气元件、设备或线路等）从电力系统中切除，使故障部分免于继续遭到破坏，保证其他无故障部分迅速恢复正常运行。

(2) 反映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）动作于发出信号、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，以免不必要的动作和由于干扰而引起的误动作。如发生主变压器过负荷、过热、轻瓦斯、控制回路断线、绝缘不良等不正常状态时，继电保护装置发出相应的信号，引起值班人员注意，及时采取措施，消除不正常状态。

此外，继电保护与自动重合闸装置配合使用，对于改善供电方案，进一步提高供电质量很有价值。实践证明，电线路 70% 左右的短路故障属于瞬时性故障，具有自消性，即在继电保护装置动作、断路器跳闸后，短路故障可以自行消除，采用自动重合闸装置将断路器重合闸后仍能继续正常供电，重合闸成功率为 70%~90%。对于少数非自消性故障，虽然重合闸不成功，但由于有了完善的继电保护装置，断路器可以再次迅速跳闸，将故障切除。由此可见，继电保护是保证电力系统安全运行和提高供电质量的重要手段。

第二节 继电保护的原理和分类

一、继电保护的工作原理概念

继电保护的基本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，当这些信息量达到一定值时，继电保护装置启动逻辑控制环节，发出相应的跳闸脉冲或信号，从而切除系统中的故障部分。这些物理量包括电流、电压、线路测量阻抗、电压电流间相位、负序和零序分量等。

以图 1-2 所示的最简单的过电流保护作用示意图为例，线路正常运行时，断路器 QF 主触头和辅助常开触头均闭合，此时电流互感器 TA 二次侧电流 I_2 小于给定值（继电保护中称作整定值），继电器 K 衔铁不吸合，其触头处于断开状态，线路被认为处于正常运行状态。在正常运行时， I_2 小于整定值，继电器不动作。

当保护范围内发生短路时，从电源到短路点之间将流过非常大的短路电流，电流互感器 TA 的一次侧电流 I_1 增大，二次侧流入继电器 K 线圈中的电流 I_2 也将增大，如果超过给定值，则继电器 K 的衔铁吸合动作，常开触点闭合，使跳闸线圈 YR 受电，铁心被向上吸动，顶开

牵引供电系统继电保护

脱扣机构和断路器 QF 主触头，使断路器 QF 跳闸，断开短路部分。断路器 QF 跳闸后，它的辅助常开触点也断开，使 YR 断电。保护范围内发生短路故障，使 I_2 大于整定值时，继电器跳闸动作。

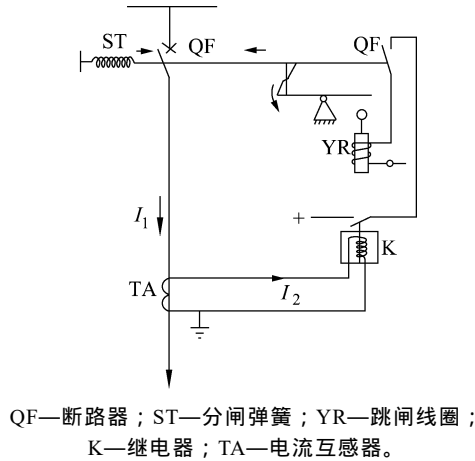


图 1-2 电流保护作用示意图

该示例的过电流继电保护的核心是电流继电器，它通过电流互感器受电，一直检测回路电流值，并与给定值做比较，一旦超过给定值就动作，向断路器跳闸机构送出跳闸命令。继电保护装置的构成原理虽然有很多，但是概括起来继电保护装置由测量部分、逻辑部分和执行部分组成，其原理框图如图 1-3 所示。

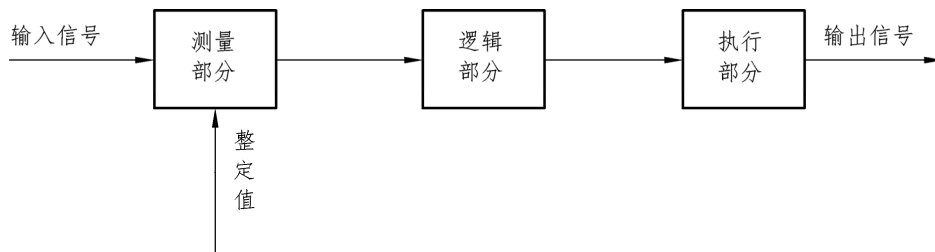


图 1-3 继电保护装置的原理框图

- (1) 测量部分：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”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，确定是否应该使断路器跳闸或发出信号，并将有关信号传送给执行部分。继电保护中常用的逻辑回路有“或”“与”“否”“延时启动”“延时返回”及“记忆”等。
- (3) 执行部分：根据逻辑部分传送的信号，最终完成保护装置所承担的任务，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。

二、继电保护装置的分类

(一) 按保护装置反应的参数分类

(1) 电流保护：测量比较元件反应的是流过保护安装处的电流 I 。正常情况下，电流小于整定值，保护不动作。当发生短路、电流等于或大于整定值时，保护动作。

(2) 欠电压保护：测量比较元件反应的是保护安装处的电压 U 。正常情况下，电压高于整定值，保护不动作。当发生短路、电压等于或低于整定值时，保护动作。

(3) 距离保护：测量比较元件反应的是从保护安装处至短路点的线路阻抗 $Z = U/I$ 。正常情况下，电流 I 小，电压 U 高，阻抗 Z 大于整定值，保护不动作。在短路情况下，保护安装处电流回路中的电流 I 增大，母线电压 U 降低，阻抗 Z 减小；当 Z 小于整定值时，保护动作。

(4) 差动保护：测量比较元件反应的是被保护设备两端的电流差 Δ 。正常情况下和保护范围外部短路时，该电流差小，保护不动作。当保护范围内发生短路时，该电流差增大，保护动作。

(5) 方向性保护：在双侧电源线路中，为了判别短路的方向，确保继电保护的选择性，往往增加方向元件，或使测量比较元件本身具有方向性，从而构成具有方向性的保护装置。正常情况下或反方向短路时，保护不动作。正方向短路时，保护动作。

(6) 反映某一对称分量（如零序分量或负序分量）的保护：这时在变换电路中应包括对称分量滤波器，以获得所需要的相序分量。正常情况下，该相序分量小于整定值，保护不动作。当发生不对称短路故障时，零序或负序分量将等于或大于整定值，保护动作。

(二) 按保护装置的构成元件分类

(1) 电磁型保护：由电磁型继电器构成。

(2) 感应型保护：测量比较元件由感应型继电器构成。

(3) 整流型保护：测量比较元件由整流型继电器构成。

(4) 晶体管型保护：由晶体管型继电器构成。

(5) 集成电路型保护：由集成电路型继电器构成。

(6) 微型计算机保护：由微型计算机和相关的电路构成。

(三) 按用途分类

(1) 线路保护：被保护设备是线路。

(2) 母线保护：被保护设备是母线。

(3) 变压器保护：被保护设备是变压器。

(4) 牵引网保护：被保护设备是牵引网。

牵引供电系统继电保护

(5) 电容补偿装置保护：被保护设备是电容补偿装置。

(四) 按保护的后备问题分类

(1) 主保护。

(2) 后备保护：包括近后备保护和远后备保护。

(3) 辅助保护。

第三节 对继电保护装置的基本要求

根据继电保护在电力系统中所担负的任务，一般情况下，对动作于跳闸的继电保护在技术上有4个基本要求：选择性、速动性、灵敏性、可靠性。这些要求需要针对使用条件的不同，在设计时进行综合考虑。

一、选择性

保护装置的选择性是指电力系统某点发生短路时，继电保护动作，将与短路部分直接有关的断路器跳闸，仅把故障部分切除，而非故障部分仍能继续运行，使停电范围最小。例如：图 1-1 中，当 k_1 点短路时，应当只是 QF_2 跳闸；当 k_2 点短路时，应当只是 QF_4 、 QF_6 、 QF_7 跳闸；当 k_3 点短路时，应当只是 QF_5 、 QF_8 跳闸。将短路故障部分切除后，其余非故障部分仍能继续供电。选择性由合理地采用继电保护方式与正确的整定计算、调试、运行维护来保证。

二、速动性

继电保护的速动性是指在电力系统发生短路故障时，继电保护应当尽快地动作，使与短路点直接有关的断路器跳闸，迅速将故障切除。其目的是：

- (1) 缩短用户在电压降低的情况下工作的时间。
- (2) 减轻电气设备可能受损坏的程度。
- (3) 防止故障扩展。
- (4) 有利于提高电力系统并列运行的稳定性。

从理想情况考虑，速动性不应当影响选择性。例如：图 1-1 中，如果 k_1 点发生短路，短路电流也同时流过变压器 T_1 和 T_2 ，其保护装置的动作时限应大于 QF_2 保护装置的动作时限，这样才能保证选择性。但是，如果变压器内部（如图 1-1 中 k_2 点）发生短路，其两侧的断路器应尽快跳闸。可见速动性与选择性不可能同时实现，要保证选择性，必须使之具有一定的动作时间，这往往需要采用比较复杂的继电保护装置。对发生不正常运行状态时只需要发出信号的继电保护装置，一般不要求迅速动作，而是按照选择性的要求发出信号。

三、灵敏性（也叫灵敏度）

继电保护的灵敏性是指在保护范围内发生短路故障或异常运行状态时，保护装置能敏锐

反应并动作的能力，没有因反应不灵敏而拒动的现象。满足灵敏性要求的保护装置应该在规定的保护区内短路时，不论短路点位置、短路形式及系统的运行方式如何，都能够灵敏反应。灵敏性一般用灵敏系数 K_{sen} 来衡量。

(1) 对于反应短路时参数值增加的保护装置：

$$\text{灵敏系数 } K_{sen} = \frac{\text{保护区末端金属性短路时保护安装处测量到的故障参数的最小计算值}}{\text{保护装置的動作参数整定值}}$$

(2) 对于反应短路时参数值降低的保护装置：

$$\text{灵敏系数 } K_{sen} = \frac{\text{保护装置的動作参数整定值}}{\text{保护区末端金属性短路时保护安装处测量到的故障参数的最大计算值}}$$

大多数情况下，电力系统短路故障是非金属性的，且故障参数在计算时都会有一定误差，所以一般要求 $K_{sen} > 1$ 。

四、可靠性

继电保护的可靠性是指保护装置本身的元件与接线等都处于良好状态时（保护装置本身不存在任何故障），在它规定的保护范围内发生属于它应该动作的短路故障时，不应该由于它本身有缺陷而拒绝动作；当线路正常运行，在规定保护范围外发生短路故障等任何不应该由它动作的短路时，不应该由于它本身有缺陷而误动作。简单地说，可靠性是指保护装置该动作时应可靠动作，不该动作时应可靠不动作。为了提高继电保护的可靠性，应注意以下几点。

(1) 采用的继电器及触点应尽可能少，选择的继电器和其他元件应当质量高、动作可靠，并且正确地整定计算。

(2) 装配、施工时，应正确无误，保证施工质量。

(3) 合理调整试验，加强日常运行维护管理。

第四节 继电保护的发展概况

熔断器可以说是最早的过电流保护器件，它的特点是融保护装置与切断电流的装置于一体。因其结构简单，至今仍广泛用作低压配电线路、小型配电变压器和低压用电设备的保护。由于电力系统的迅速发展，用电设备功率、发电机容量不断增大，发电厂、变电所和供电电网的接线越来越复杂，熔断器不能满足选择性和速动性的要求，于是出现了专门作用于断流装置（断路器）的电磁型过电流继电器，利用继电器和断路器的配合来实现电力系统的保护。

20 世纪初，继电器开始广泛应用于电力系统的保护。1901 年，出现了用感应型电流继电

器构成的电流保护。1908年，电流差动保护被提出。1910年，电流方向保护被采用，感应型功率方向继电器被应用。1920年，感应型阻抗继电器构成的距离保护被应用。1927年以后，输电线路的高频保护开始应用，电子管构成的高频发送与接收电路被应用。

20世纪50年代以前的继电保护装置都是由电磁型、感应型继电器构成的，这些继电器都具有机械转动部分，统称为机电式继电器。由这些继电器构成的继电保护装置称为机电式保护装置。机电式保护装置虽然工作比较可靠，运行经验丰富，但是体积大，功率消耗多，动作速度慢，机械转动部分和触点容易磨损或粘连，调试比较复杂，不能满足超高压、大容量电力系统的要求。

20世纪60年代以来，随着半导体技术的迅速发展，应用半导体器件的整流型保护装置和晶体管型保护装置逐渐受到重视，并被推广应用。晶体管型继电保护的优点：动作迅速、灵敏度高、体积小、质量小、功率消耗少、无触点、无机械磨损等。其缺点：离散性大、抗干扰能力较差、工作可靠性较低。经过继电保护工作者不懈的努力，这些缺点逐步得到了满意的解决，晶体管型保护装置的正确动作率达到了同机电式保护装置一样的水平。20世纪70年代是晶体管型和整流型继电保护装置在我国被大量采用的时期，满足了当时电力系统向超高压、大容量方向发展的需要。晶体管型继电保护装置由于无机械转动部分而称为静态继电保护装置。

随着电子技术的发展，出现了体积更小、工作更可靠的集成运算放大器和其他集成电路元件。这就促使静态继电保护装置向集成电路化方向发展。20世纪80年代后期，是静态继电保护装置从第一代（晶体管型）向第二代（集成电路型）过渡和发展的时期。

20世纪70年代以来，随着电子计算技术的迅速发展，特别是微处理器技术的迅速发展及其价格的急剧下降，出现了微型计算机型继电保护装置（简称微机保护）。1984年，我国第一套高压输电线路微机保护装置在电力系统投入试运行，于80年代后期通过部级鉴定，并投入小批量生产。在我国电气化铁道方面，由西南交通大学研制的第一套WXB-61型微机电力牵引馈线保护与故障测距装置，于1992年通过部级鉴定。铁道科学研究院研制的WXB71型电气化铁道馈电系统微机保护及故障测距装置、WBZ-71型电气化铁道牵引变电所主变压器微机保护装置和WRZ-71型电气化铁道牵引变电所电容器并联补偿微机保护装置，于1993年通过部级鉴定。

微机保护装置未来发展将向计算机化，网络化，智能化，保护、控制、测量和数据通信一体化发展。伴随着计算机技术和电子技术的飞速发展，新的控制技术和元件不断得到应用，微机保护的研究和功能将向更高层次发展，如功能更强大的CPU、DSP等芯片的应用，不断优化的人工智能算法，4G、5G等更先进的无线通信技术，光纤通信，量子通信，等等。同时，保护装置的体积也在不断变小。可以说，微机保护代表着电力系统继电保护的未來，成为电力系统保护、控制、测量、信号、运行调度和事故处理的统一计算机系统（电力系统综合自动化系统）的组成部分。

思考与练习

一、填空题

1. 继电保护的选择性是指继电保护动作时,只能把_____从系统中切除_____继续运行。
2. 电力系统相间短路的形式有_____短路和_____短路。
3. 电力系统发生相间短路时,_____大幅度下降,_____明显增大。
4. 电力系统发生故障时,继电保护装置应_____,电力系统出现不正常工作时,继电保护装置一般应_____。
5. 电力系统切除故障的时间包括_____时间和_____的时间。
6. 继电保护的灵敏性是指其对_____发生故障或不正常工作状态的_____。
7. 继电保护的可靠性是指保护在应动作时_____,不应动作时_____。

二、判断题

1. 电力系统发生故障时,继电保护装置如不能及时动作,就会破坏电力系统运行的稳定性。 ()
2. 电气设备过负荷时,继电保护应将过负荷设备切除。 ()
3. 电力系统继电保护装置通常应在保证选择性的前提下,使其快速动作。 ()
4. 电力系统故障时,继电保护装置只发出信号,不切除故障设备。 ()
5. 继电保护装置的测量部分是测量被保护元件的某些运行参数与保护的整定值进行比较。 ()
6. 保证供电可靠性就是在任何情况下都不间断对用户的供电。 ()

三、选择题

1. 对电力系统的基本要求是 ()。
A. 保证对用户的供电可靠性和电能质量,提高电力系统运行的经济性,减少对环境的不良影响
B. 保证对用户的供电可靠性和电能质量
C. 保证对用户的供电可靠性,提高系统运行的经济性
D. 保证对用户的供电可靠性
2. 电力系统最危险的故障是 ()。
A. 单相接地 B. 两相短路 C. 三相短路 D. 接地短路
3. 电力系统短路时最严重的后果是 ()。
A. 电弧使故障设备损坏
B. 使用户的正常工工作遭到破坏

- C. 破坏电力系统运行的稳定性
4. 继电保护的灵敏系数 K_{lm} 要求 ()。
- A. $K_{lm} < 1$ B. $K_{lm} = 1$ C. $K_{lm} > 1$
5. 继电保护装置是由 () 组成的。
- A. 二次回路各元件
B. 测量元件、逻辑元件、执行元件
C. 包括各种继电器、仪表回路
D. 仪表回路
6. 电力系统发生故障时, 其特点是有关运动参数将发生变化, 例如 ()。
- A. 电流降低、电压增大、电流与电压之间的相位角变化
B. 电流增大、电压降低、电流与电压之间的相位角不变
C. 电流增大、电压增大、电流与电压之间的相位角不变
D. 电流增大、电压降低、电流与电压之间的相位角变化
7. 我国继电保护技术发展先后经历了五个阶段, 其发展顺序依次是 ()。
- A. 机电型、晶体管型、整流型、集成电路型、微机型
B. 机电型、整流型、集成电路型、晶体管型、微机型
C. 机电型、整流型、晶体管型、集成电路型、微机型

四、简答题

1. 什么是故障、异常运行方式和事故? 它们之间有何不同? 又有何联系?
2. 继电保护装置的任务及其基本要求是什么?
3. 什么是保护的极大与最小运行方式, 确定极大与最小运行方式应考虑哪些因素?
4. 在图 1-4 中, 各断路器处均装有继电保护装置 (P1 ~ P7)。试回答下列问题:

(1) 当 k_1 点短路时, 根据选择性要求应由哪个保护动作并跳开哪个断路器? 如果 6QF 因失灵而拒动, 保护又将如何动作?

(2) 当 k_2 点短路时, 根据选择性要求应由哪些保护动作并跳开哪几个断路器? 如果此时保护 3 拒动或 3QF 拒跳, 但保护 P1 动作并跳开 1QF, 问此种动作是否有选择性? 如果拒动的断路器为 2QF, 对保护 P1 的动作又应该如何评价?

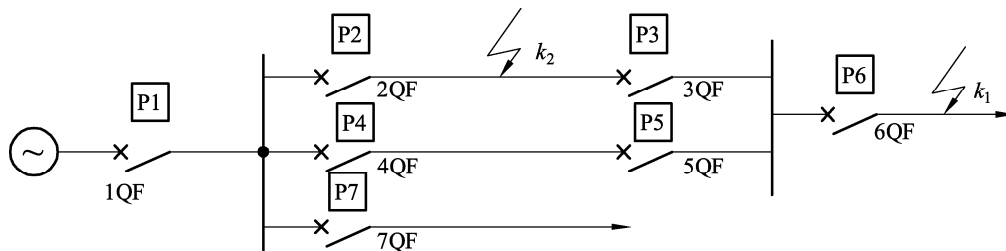


图 1-4

5. 什么是主保护、后备保护和辅助保护? 远后备保护和近后备保护有什么区别?
6. 利用电力系统正常运行和故障时参数的差别, 可以构成哪些不同原理的继电保护?

