

# 继电保护

中国电力企业家协会供电分会编

中国电力出版社

## 内 容 提 要

本书为《全国供用电工人技能培训教材·继电保护》中级工，全书共十一章，主要介绍电力系统及继电保护常用保护类型（如电流保护、接地保护、距离保护、纵差保护、母差保护、高频保护、变压器保护、电容器保护、自动重合闸等）的构成、基本原理以及试验要求、运行维护等方法，书中每章后有复习题。

本书既可作为继电保护工的培训教材，也可供有关继电保护专业技术人员参考。

### 图书在版编目（CIP）数据

继电保护/中国电力企业家协会供电分会编. -北京：中国电力出版社，2001

全国供用电工人技能培训教材

ISBN 7-80125-770-7

. 继... . 中... . 电力系统-继电保护-技术培训-教材 . TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2000）第 54444 号

### 继电保护（中级工）

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>）

水电印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2001 年 5 月第一版 2001 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 32 开本 13.25 印张 291 千字 3 插页

印数 0001—3000 册 全三册定价 53.00 元（本册 22.00 元）

版 权 专 有 翻 印 必 究

（本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换）

# 编 者 的 话

本书根据《全国供用电工人技能培训教材》编审委员会的出版规划，以供用电工人职业技能培训为重点，根据原能源部《电力工人技术等级标准》要求，分初、中、高三个等级，介绍了继电保护专业的基本概念、原理和主要检验方法或项目。

本书是以继电保护工为对象，讲述的内容基本上偏重于生产实际，适当地加入一些理论分析，某些章节还穿插了一些新型微机保护。在应用方面，对一些实际应用接线等作了简单介绍，以求做到深浅适合，便于对技能知识的理解和掌握。本书初、中、高级工三册在编写过程中，各分册内容既独立又互相对应，分层次深浅讲述，循序渐进，突出各等级工的专业技能培训要求。本书每章均附有复习题，供学后检测。

本书在编写过程中，承蒙各地专业技术人员的大力支持和热心赐教，在此特表谢意。此外，镇江供电局许国平同志对本书审稿后的书稿进行了大量的修改、校订工作，在此一并致谢。

限于编写水平，错误和不妥之处一定不少，希望广大读者批评指正。

上海市区供电局

2000年8月

# 目 录

关于《全国供用电工人技能培训教材》的审定意见

前言

编者的话

<b>第一章</b>	<b>电网相间短路的方向电流保护</b> .....	1
第一节	过流保护装置方向性的提出 .....	1
第二节	功率方向继电器 .....	4
第三节	保护回路中的功率方向继电器的接线 方式及其分析 .....	16
第四节	非故障相电流的影响与按相起动 .....	22
第五节	方向电流保护装置的整定 .....	26
第六节	方向电流保护接线举例及评价 .....	29
第七节	整套保护的校验项目及要 求 .....	31
复习题	.....	33
<b>第二章</b>	<b>电力网的接地短路保护</b> .....	36
第一节	对高压线路接地保护的技术要求 .....	36
第二节	中性点直接接地电力网的零序电流、电压 和功率的简单分析 .....	37
第三节	大接地电流系统零序电流保护 .....	40
第四节	大接地电流系统中零序电流方向保护 .....	46
第五节	零序电流方向保护的校验项目及要 求 .....	57
第六节	对零序电流方向保护的评价 .....	63
第七节	中性点经小电阻接地电网的保护方式 .....	65

复习题 .....	75
<b>第三章 距离保护</b> .....	<b>78</b>
第一节 距离保护的作用及其基本原理 .....	78
第二节 阻抗继电器 .....	83
第三节 阻抗继电器举例.....	107
第四节 影响距离元件正确测量的基本因素及克服方法.....	113
第五节 电力系统振荡对距离保护的影响.....	122
第六节 电压回路断线对距离保护的影响.....	135
第七节 三段式距离保护接线举例.....	138
第八节 距离保护校验项目及要求的.....	144
复习题.....	153
<b>第四章 电网的差动保护</b> .....	<b>156</b>
第一节 线路的纵联差动保护.....	156
第二节 平行线路的横联方向差动保护.....	176
第三节 平行线路的电流平衡保护.....	190
复习题.....	192
<b>第五章 高频保护</b> .....	<b>195</b>
第一节 高频保护的基本原理及分类.....	195
第二节 构成高频通道的一次设备的作用及其构造.....	196
复习题.....	198
<b>第六章 电力变压器保护</b> .....	<b>200</b>
第一节 变压器差动保护.....	200
第二节 变压器的过电流和过负荷保护.....	253
第三节 变压器接地保护.....	263

第四节	变压器保护的接线全图举例.....	267
第五节	应注意的问题.....	271
复习题	.....	272
<b>第七章</b>	<b>母差保护</b> .....	<b>275</b>
第一节	母线接线方式及其保护.....	275
第二节	电流差动式母线保护.....	282
第三节	母联电流相位比较式母线保护.....	291
第四节	断路器失灵保护.....	305
复习题	.....	310
<b>第八章</b>	<b>电力电容器组的继电保护</b> .....	<b>312</b>
第一节	双星形接线的中性点电流平衡保护.....	313
第二节	三角形接线的横差电流保护.....	328
第三节	单星形接线的桥差保护.....	335
第四节	保护的调试项目及要​​求.....	340
复习题	.....	343
<b>第九章</b>	<b>高压输电线路的自动重合闸</b> .....	<b>345</b>
第一节	双侧电源输电线路的自动重合闸构成.....	345
第二节	单相自动重合闸.....	349
第三节	综合自动重合闸.....	355
第四节	综合重合闸接线举例.....	360
第五节	综合自动重合闸的评价及应用.....	368
复习题	.....	368
<b>第十章</b>	<b>低频减负荷装置</b> .....	<b>370</b>
第一节	频率稳定的重要性.....	370
第二节	电力系统频率特性.....	371
第三节	实现低频减负荷的基本要求.....	373

第四节	低频率减负荷装置.....	377
第五节	低频继电器校验项目及要 求.....	382
复习题	.....	387
<b>第十一章</b>	<b>故障录波器</b> .....	<b>389</b>
第一节	故障录波器的作用.....	389
第二节	光线式故障录波装置.....	391
复习题	.....	407

# 第一章 电网相间短路的方向电流保护

## 第一节 过流保护装置方向性的提出

阶段式电流保护适用于单侧电源辐射形电网。随着电力系统的发展和用户对供电可靠性要求的提高，现代电网多为双侧电源电网及环形电网，如图 1-1 所示。在这样的电网中，为了切除线路上的故障，线路两侧都应装设断路器和相应保护。

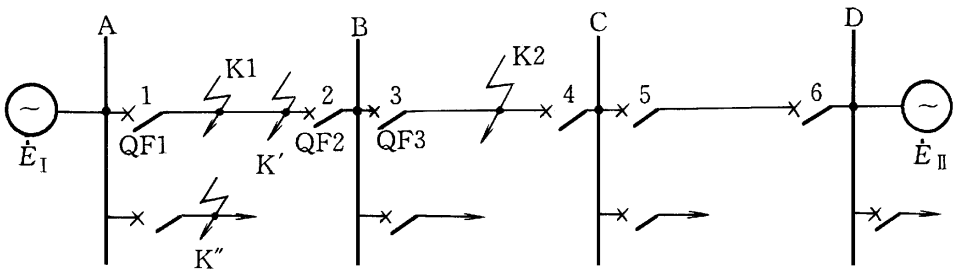


图 1-1 双侧电源电网

在如图 1-1 中，K1 点短路时，保护 1、2 动作，使断路器 QF1、QF2 跳闸，切除故障。接于母线 A 上的用户可由电源  $\dot{E}_I$  继续供电；接于 B、C、D 母线上的用户可由电源  $\dot{E}_I$  继续供电。这样可提高对用户供电的可靠性，但却给阶段式电流保护带来新的问题。

(1) 对于瞬时电流速断保护，为了在区外故障时使保护

不误动，其整定值不仅要躲过本线路末端短路时通过保护的最大短路电流，而且要躲过保护反方向故障时通过本保护的最大短路电流。图 1-1 中，保护 1 的第 I 段的整定值不仅要按 K 点短路考虑，还要考虑 K 点短路，若  $I_K > I_{K1}$ ，则将使动作电流增大，保护的灵敏度降低。

(2) 对于限时电流速断保护，不仅要与相邻下一线路的第 II 段配合，而且还要与其在同一母线上的各条出线的第 II 段相配合。如图 1-1 中，保护 1 的第 II 段，不仅要与保护 3 的第 II 段相配合，还要与母线 A 上其他出线的第 II 段相配合，同样可能降低保护的灵敏度。

(3) 对于过电流保护，仅靠时限的配合已无法获得选择性。如图 1-1 中，K1 短路时，断路器 QF2 应比断路器 QF3 先跳闸，要求保护 2 的时限  $t_2$  应小于保护 3 的时限  $t_3$ ，即  $t_2 < t_3$ 。但是，当 K2 点短路时，则 QF3 应比 QF2 先跳闸，要求保护 3 的时限  $t_3$  应小于保护 2 的时限  $t_2$ ，即  $t_3 < t_2$ 。两种情况的要求是相矛盾的。因此，需要考虑利用故障电流通过母线的方向来协调此矛盾，这就是方向保护的出发点。

为了解决双侧电源电网对继电保护的方向要求，分析在双侧电源线路上发生短路时电气量变化的特点。

在如图 1-2 (a) 所示的网络接线中，对保护 1，当正方向 K1 点短路时，如果短路电流  $\dot{I}_{K1}$  的给定正方向是从保护安装处母线流向线路，则它滞后于该母线电压  $\dot{U}$  一个相角  $\varphi_{K1}$ ，( $\varphi_{K1}$  为从母线至 K1 点之间的线路阻抗角)，其值为  $0^\circ < \varphi_{K1} < 90^\circ$ ，如图 1-2 (b) 所示；当反方向 K2 点短路时，通过保护 1 的短路电流是由电源  $\dot{E}$  供给的。此时对保护 1

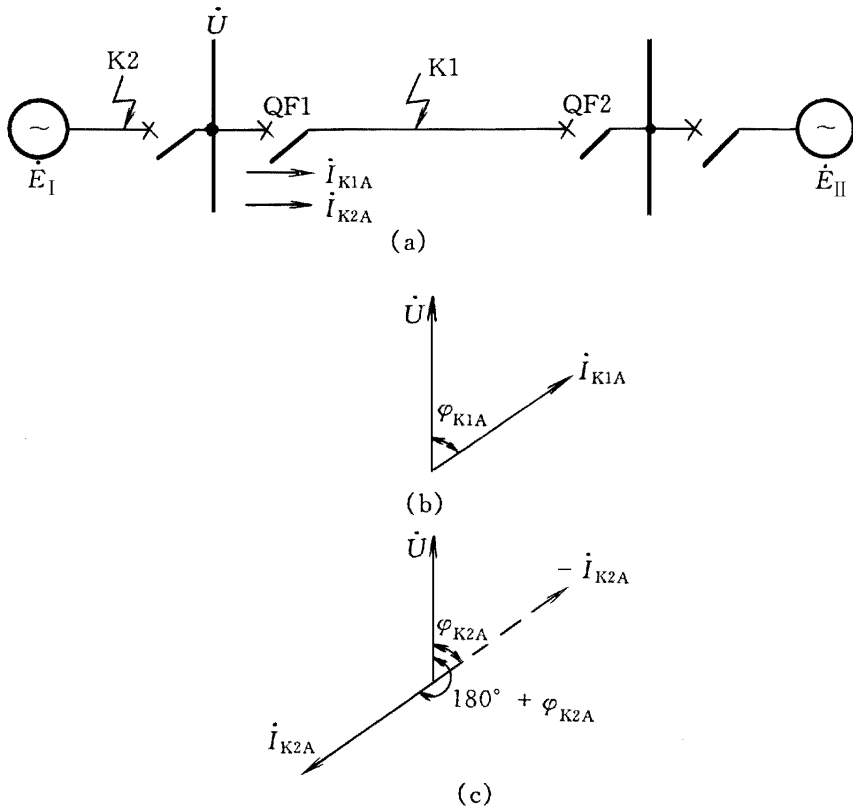


图 1-2 双侧电源网络不同线路短路时电压电流相位关系  
 (a) 网络接线; (b) K1 点短路相量图; (c) K2 点短路相量图

如果仍按规定的电流正方向观察，则  $i_{K2}$  滞后于母线电压  $\dot{U}$  的相角将是  $180^\circ + \varphi_{K2}$  ( $\varphi_{K2}$  为从该母线至 K2 点之间的线路阻抗角)，其值为  $180^\circ < (180^\circ + \varphi_{K2}) < 270^\circ$ ，如图 1-2 (c) 所示。如以母线电压  $\dot{U}$  作为参考向量，并设  $\varphi_{K1} = \varphi_{K2} = \varphi_K$ ，则  $i_{K1}$  和  $i_{K2}$  的相位相差  $180^\circ$ 。在一般习惯上，将相间短路电压和电流之间的阻抗角小于或等于  $90^\circ$  时称为正方向，即故障电流从母线流向线路；如果电压和电流之间的阻抗角为  $180^\circ + \varphi_K$  称为反方向，即故障电流自线路流向母线。因此利用判别短路功率的方向或电流、电压之间的相位

关系，就可以判别发生故障的方向。根据这个特点，在具体考虑相互配合时，按图 1-1 所示，则保护 1、3、5 和保护 6、4、2 分别按照  $\dot{E}$  向  $\dot{E}$  方向和  $\dot{E}$  向  $\dot{E}$  方向分两组配合，保护 2 和保护 3 之间的配合则不需考虑。在方向电流保护中，用以判别功率方向或测定电流、电压间相位角的继电器称为功率方向继电器。

## 第二节 功率方向继电器

对继电保护中方向继电器的基本要求是：

(1) 应具有明确的方向性，即在正方向发生各种故障（包括故障点有过渡电阻的情况）时，能可靠动作，而在反方向故障时，可靠不动作；

(2) 故障时继电器的动作有足够的灵敏度。

目前使用的功率方向继电器有感应型、整流型和晶体管型。现分别以感应型和整流型功率方向继电器为例说明其工作原理。

### 一、感应型功率方向继电器

#### 1. 构造与工作原理

感应型功率方向继电器是按比较相位原理构成的功率方向继电器。直接测量接入继电器的电压  $\dot{U}_i$  和电流  $\dot{i}_i$  之间的相位，判别短路功率方向，以区分正、反向故障。

图 1-3 所示是 GG-11 感应型功率方向继电器磁系统图，继电器的铁芯是带四个磁极的方形铁芯，在四个磁极之间放置有圆铁芯柱，在磁极和圆铁芯柱之间，装有铝制圆筒，动触点固定在转轴的绝缘套上，动触点为圆柱形。动、静触点相互垂直，

静触点的电木底座固定在平台上。在铁芯的轭上安装着四个串联的电压线圈，在磁极上安装着两个串联的电流线圈。

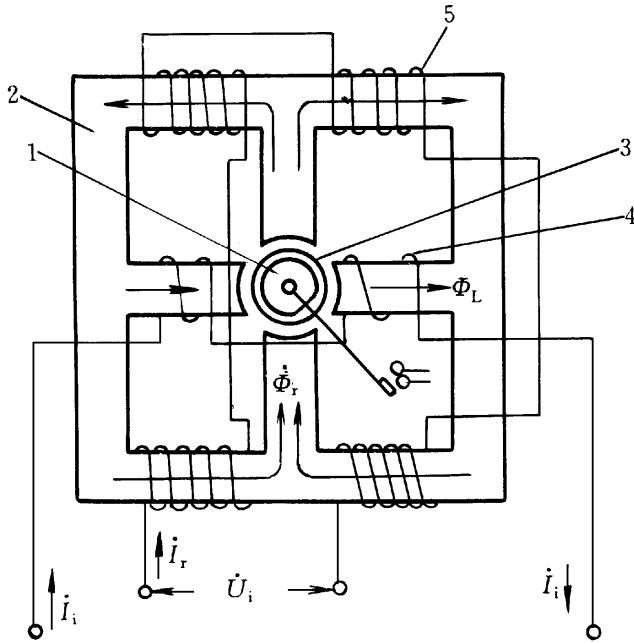


图 1-3 GG-11 感应型功率方向继电器磁系统图

- 1—铝制圆筒；2—铁芯；3—圆柱铁芯；  
4—电流线圈；5—电压线圈

假定 A 相功率方向继电器，加入电压  $\dot{U}_i (= \dot{U}_A)$  和电流  $\dot{i}_i (= \dot{i}_A)$ ，则当正方向短路时，如图 1-2 (b) 所示，继电器中电压、电流之间的相角为

$$\varphi_{iA} = \arg \frac{\dot{U}_A}{\dot{i}_{K1A}} = \varphi_{K1A} \quad (1-1)$$

反方向短路时，如图 1-2 (c) 所示，为

$$\varphi_{iA} = \arg \frac{\dot{U}_A}{\dot{i}_{K2A}} = \varphi_{K2A} + 180^\circ \quad (1-2)$$

式中  $\arg \dot{U}_A / \dot{i}_{K2A}$  表示相量  $\dot{U}_A$  与  $\dot{i}_{K2A}$  之间的幅角，即分子相量超前于分母相量的角度。如取短路阻抗角  $\kappa = 60^\circ$ ，画出正方向短路时相量关系如图 1-4 所示。一般的功率方向继电器当输入电压和电流的幅值不变时，其输出（转矩或电压）值随两者间相位差的大小而改变，输出为最大时的相位差称为继电器的最大灵敏度。为了在最常见的短路情况下使继电器动作最灵敏，采用上述接线的功率方向继电器应做成最大灵敏角  $\alpha_{sen}$  和短路阻抗角相等即  $\alpha_{sen} = \kappa = 60^\circ$ 。为了保证正方向故障，短路阻抗角  $\kappa$  在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内变化时，继电器都能可靠动作，继电器动作的角度范围通常取为  $\alpha_{sen} \pm 90^\circ$ ，动作特性在复数平面上是一条直线，如图 1-5 (a) 所示，阴影部分为动作区。其动作方程可表示为

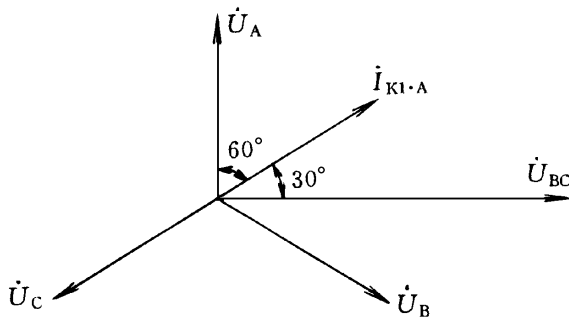


图 1-4 三相短路  $\kappa = 60^\circ$  时相量图

$$\alpha_{sen} + 90^\circ < \arg \frac{\dot{U}_i}{\dot{i}_i} < \alpha_{sen} - 90^\circ \quad (1-3)$$

当选取  $\alpha_{sen} = \kappa = 60^\circ$  时，以  $\dot{U}_i$  为参考相量，在  $\dot{i}_i$  超前其  $30^\circ$  至滞后其  $150^\circ$  的范围内，继电器均能动作。如用  $\alpha$  表示  $\dot{U}_i$  超前于  $\dot{i}_i$  的角度，并用功率的形式表示，则式 (1-3)

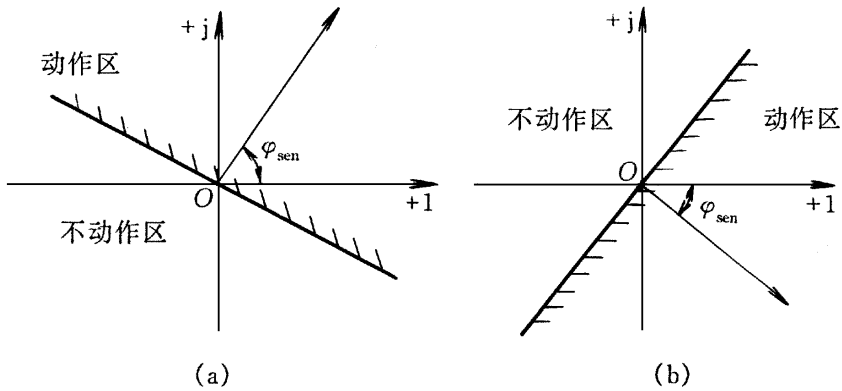


图 1-5 功率方向继电器的动作特性  
 (a) 按式 (1-3) 构成; (b) 按式 (1-5) 构成

可写成

$$U_i I_i \cos(\alpha_i - \alpha_{sen}) > 0 \quad (1-4)$$

当余弦项和  $U_i$ 、 $I_i$  越大时，其值也越大，继电器动作的灵敏度越高，而任一项等于零或余弦项为负时，继电器将不能动作。根据这个原理，通过调整  $\alpha_i$  的角度，可以调整  $\alpha_i$  和  $\alpha_{sen}$  的差值，而  $\alpha_i$  的调整，即调整电压线圈中电压和电流的阻抗角，通过串联电阻来实现，以满足不同短路方式需要。

采用这种特性和接线的继电器时，在其正方向出口附近发生三相短路、A—B 或 C—A 两相接地短路，以及 A 相接地短路时，由于  $U_A \approx 0$  或数值很小，使继电器不能达到所需要的动作功率而不能动作，此称为继电器的“电压死区”。当故障发生在死区范围以内时，整套保护将要拒动，是一个很大的缺点，因此实际上很少采用上述这种接线方式。

为了使电压死区消除或减少到最小程度，实际上广泛采用非故障的相间电压作为参考量来判别故障相电流的相位。

例如对 A 相的方向继电器施加电流  $\dot{i}_A$  和电压  $\dot{U}_{BC}$ ，此时，

$\varphi_i = \arg \dot{U}_{BC} / \dot{I}_A$ ，当正方向短路时， $\varphi_i = \varphi_K - 90^\circ = -30^\circ$ ；反方向短路时， $\varphi_i = 150^\circ$ ，相量关系亦示于图 1-4 中。在这种情况下，继电器的最大灵敏角应设计为  $\varphi_{sen} = \varphi_K - 90^\circ = -30^\circ$ ，动作特性如图 1-5 (b) 所示，动作方程为

$$90^\circ - \arcsin \frac{\dot{U}_i e^{j(90^\circ - \varphi_K)}}{\dot{I}_i} > 90^\circ \quad (1-5)$$

习惯上采用  $90^\circ - \varphi_K = \alpha$ ，称为功率方向继电器的内角，则上式可改写为

$$90^\circ - \arcsin \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} > 90^\circ - \alpha \quad (1-6)$$

如用功率的形式表示为

$$U_i I_i \cos(\varphi_i + \alpha) > 0 \quad (1-7)$$

对 A 相的功率方向继电器而言，可具体表示为：

$$U_{BC} I_A \cos(\varphi_i + \alpha) > 0 \quad (1-8)$$

当保护安装处附近发生三相短路时， $U_{BC} = 0$ ，继电器具有很小的电压死区以外，在其他任何包含 A 相的不对称短路时， $I_A$  的电流很大， $U_{BC}$  的电压很高，因此继电器不仅没有死区，而且动作灵敏度很高。为了减小和消除三相短路时的死区，在整流型和晶体管型的方向继电器中，可以采用电压记忆回路并尽量提高继电器动作时的灵敏度来消除死区，但在感应型继电器中不具备这个条件。

## 2 功率方向继电器的动作特性

在式 (1-7) 所示的动作方程中， $U_i$ 、 $I_i$  和  $\varphi_i$  均为变量，当其中任何一个变化时，继电器的起动条件都要随之改变，通常采用角度特性和伏安特性予以表示。

(1) 角度特性：当  $I_i$  固定不变时，继电器起动电压  $U_{K \cdot act} = f(\varphi_i)$  的函数关系曲线称为继电器的角度特性。如图 1-6 所示，其最大灵敏角  $\varphi_{sen} = -30^\circ$ 。当  $\varphi_K = 60^\circ$  时， $\varphi_{sen} =$

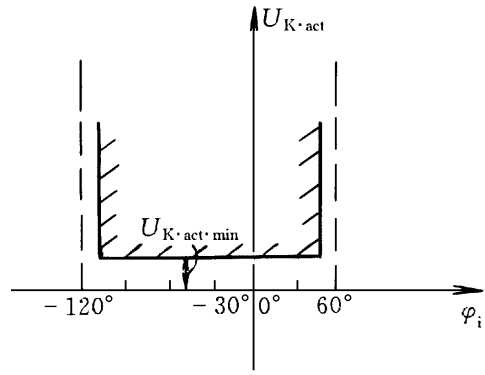


图 1-6 功率方向继电器 ( $\alpha = 30^\circ$ ) 的角度特性

为中心的  $\pm 90^\circ$  以内。在此动作范围内，继电器的最小起动电压  $U_{K \cdot act \cdot min}$  基本上与  $I_i$  无关。当施加于继电器的电压  $U_i < U_{K \cdot act \cdot min}$  时，继电器将不能起动，这就是出现“电压死区”的原因。

(2) 伏安特性：当  $\varphi_i = \varphi_{sen}$  固定不变时，继电器起动电压  $U_{K \cdot act} = f(I_i)$  的函数关系曲线称为继电器的伏安特性。在理想情况下，该曲线平行于两个坐标轴（如图 1-7 实线所示），只要施加于继电器的电流和电压分别大于最小起动电流  $I_{K \cdot act \cdot min}$  和最小起动电压  $U_{K \cdot act \cdot min}$ ，继电器就可以动作。对于感应型功率方向继电器的伏安特性，将不会是二条直线，在接近电压或电流为 0 时，特性为圆弧型（如图 1-7 中虚线所示）。

感应型功率方向继电器是机电型继电器，有机械转动部分，功耗大、体积大，早已被比较两电气量幅值原理构成的整流型功率方向继电器所代替。后者具有灵敏性好、无电压死区、调试方便及动作速度快等优点。

## 二、整流型功率方向继电器

### 1. 整流型功率方向继电器的构成与工作原理

功率方向继电器除了可按比较两个电气量相位的方法实

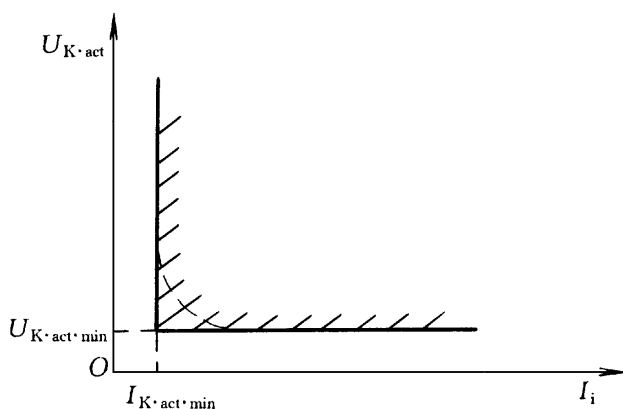


图 1-7 功率方向继电器的伏安特性

现外，还可以按比较两个电压相量幅值大小的方法实现，如图 1-8 所示。当被比较其相位的两个量

$$\dot{C} = \dot{K}_v \dot{U}_i$$

和

$$\dot{D} = \dot{K}_i \dot{I}_i$$

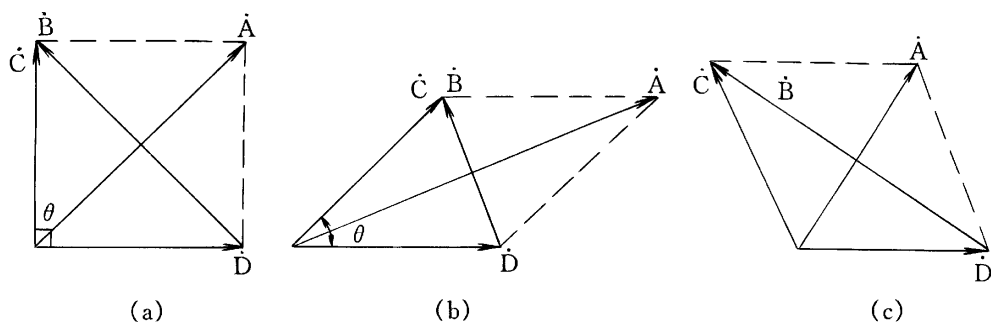


图 1-8 幅值比较与相位比较电气量之间的相量关系

$$(a) \quad = 90^\circ \text{时} \quad |\dot{A}| = |\dot{B}|; \quad (b) \quad < 90^\circ \text{时} \quad |\dot{A}| > |\dot{B}|;$$

$$(c) \quad > 90^\circ \text{时} \quad |\dot{A}| < |\dot{B}|$$

之间的相角等于  $90^\circ$ 。而继电器处于动作边缘时，此二相量的和与差所形成的另外两个相量为

$$\dot{A} = \dot{C} + \dot{D}$$