



电力系统继电保护原理

主讲教师：张沛超

Email: pczhang@sjtu.edu.cn



- ④ **电流保护：反应故障时电流量的不正常状态（增大）而动作的保护原理**
- ④ **针对相间故障**
 - 2.1 单侧电源网络相间短路电流保护
 - 2.2 电网相间短路的方向性电流保护
- ④ **针对接地故障**
 - 2.3 中性点直接接地电网接地短路的电流保护
 - 2.4 中性点非直接接地电网单相接地的电流保护

2.2 电网相间短路的方向性电流保护



1. 双侧电源网络中电流保护的问题
2. 功率方向继电器的工作原理
3. 功率方向继电器的 90° 接线方式
4. 方向性电流保护的整定及评价



2.2.1 双侧电源网络中电流保护 存在的问题



双侧电源网络

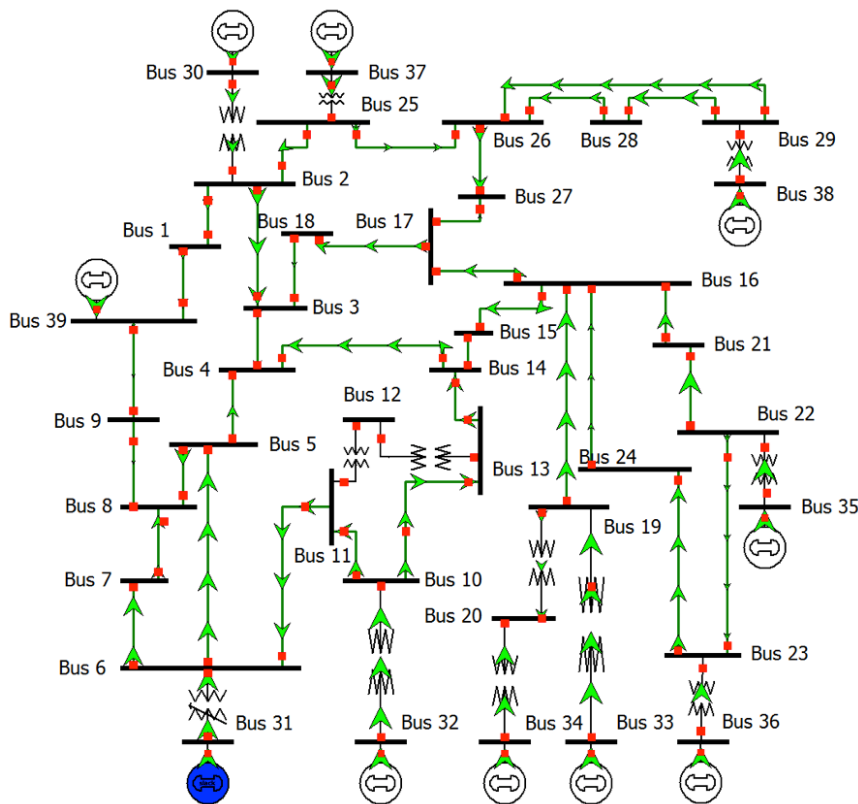


上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

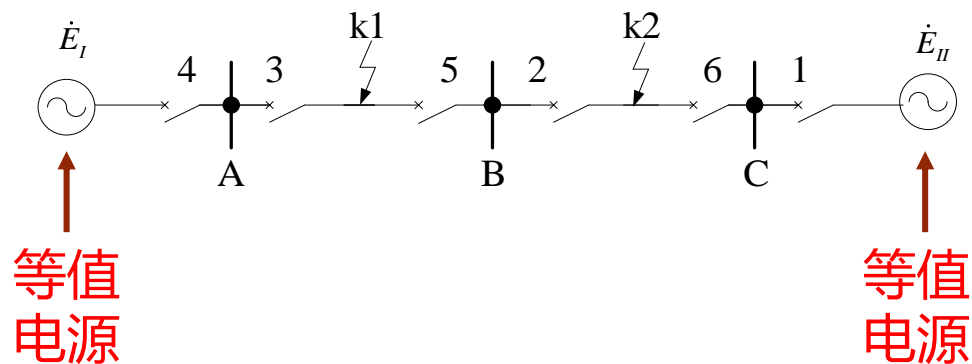
实际超高压电网为
多电源、多环路系统

在保护研究中，常将电网
简化为双侧电源网络

IEEE 39 bus test case



用于保护分析的简化电网



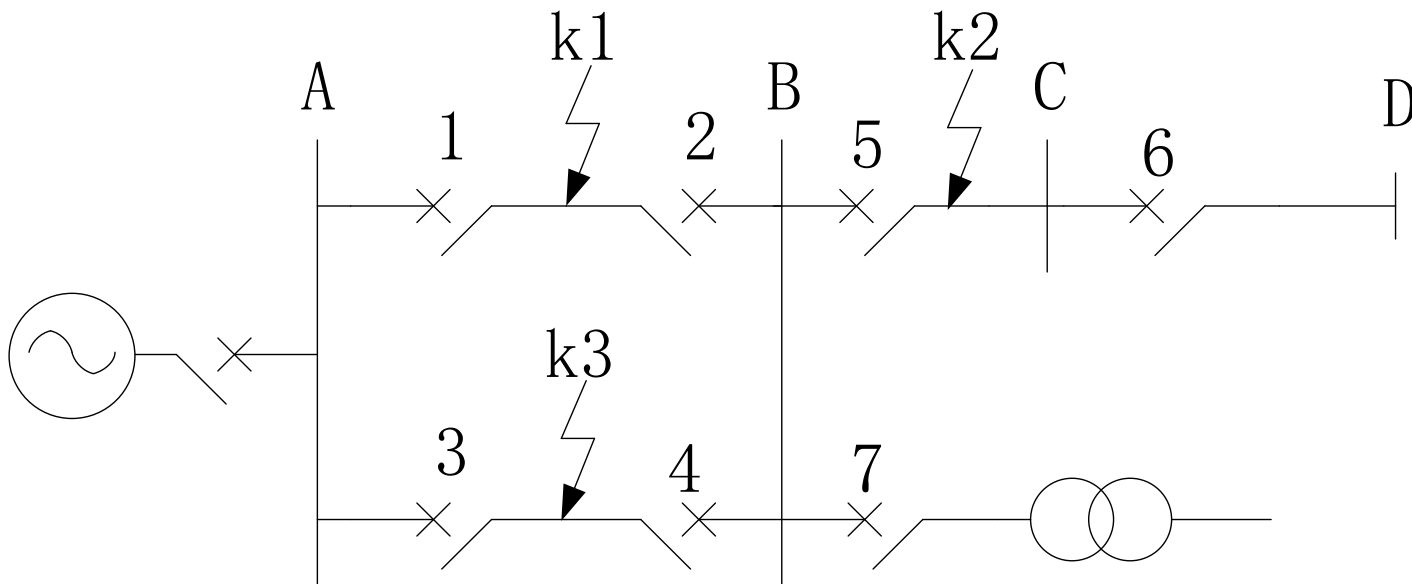
双侧电源网络



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



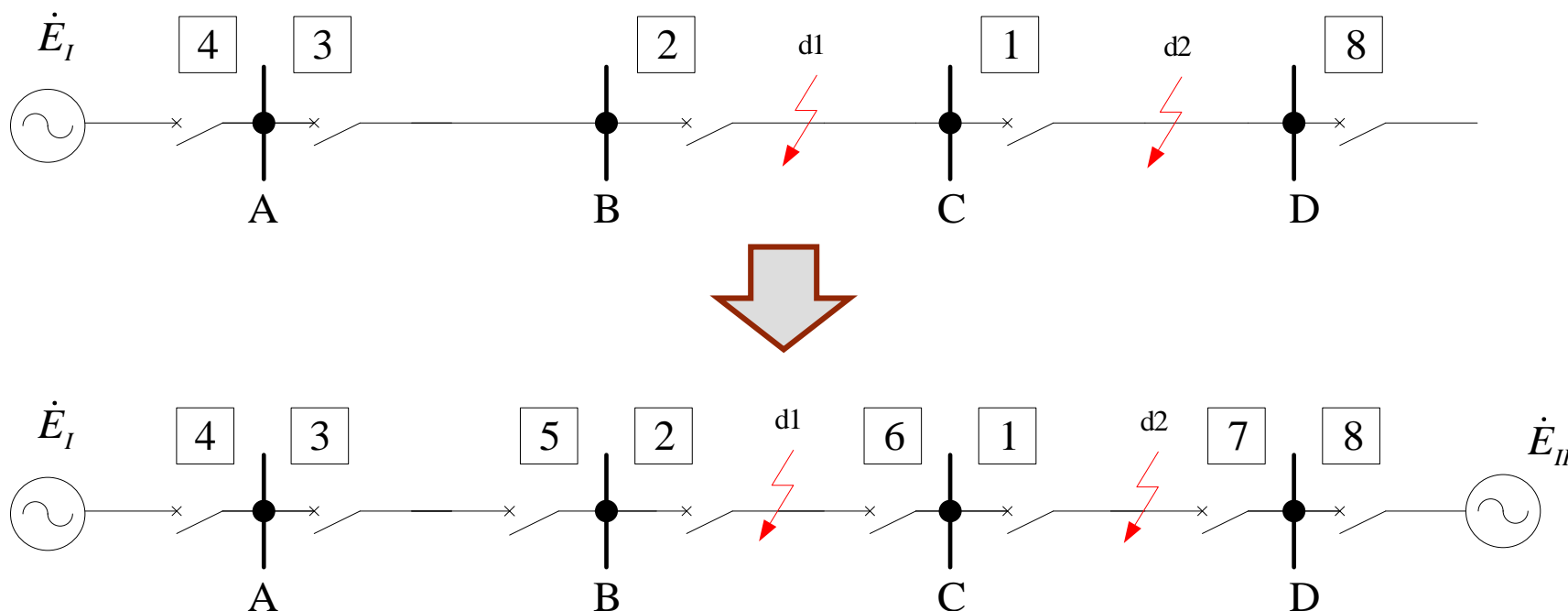
思考：当研究线路AB上的保护时，下图应视为单侧电源网络还是双侧电源网络？



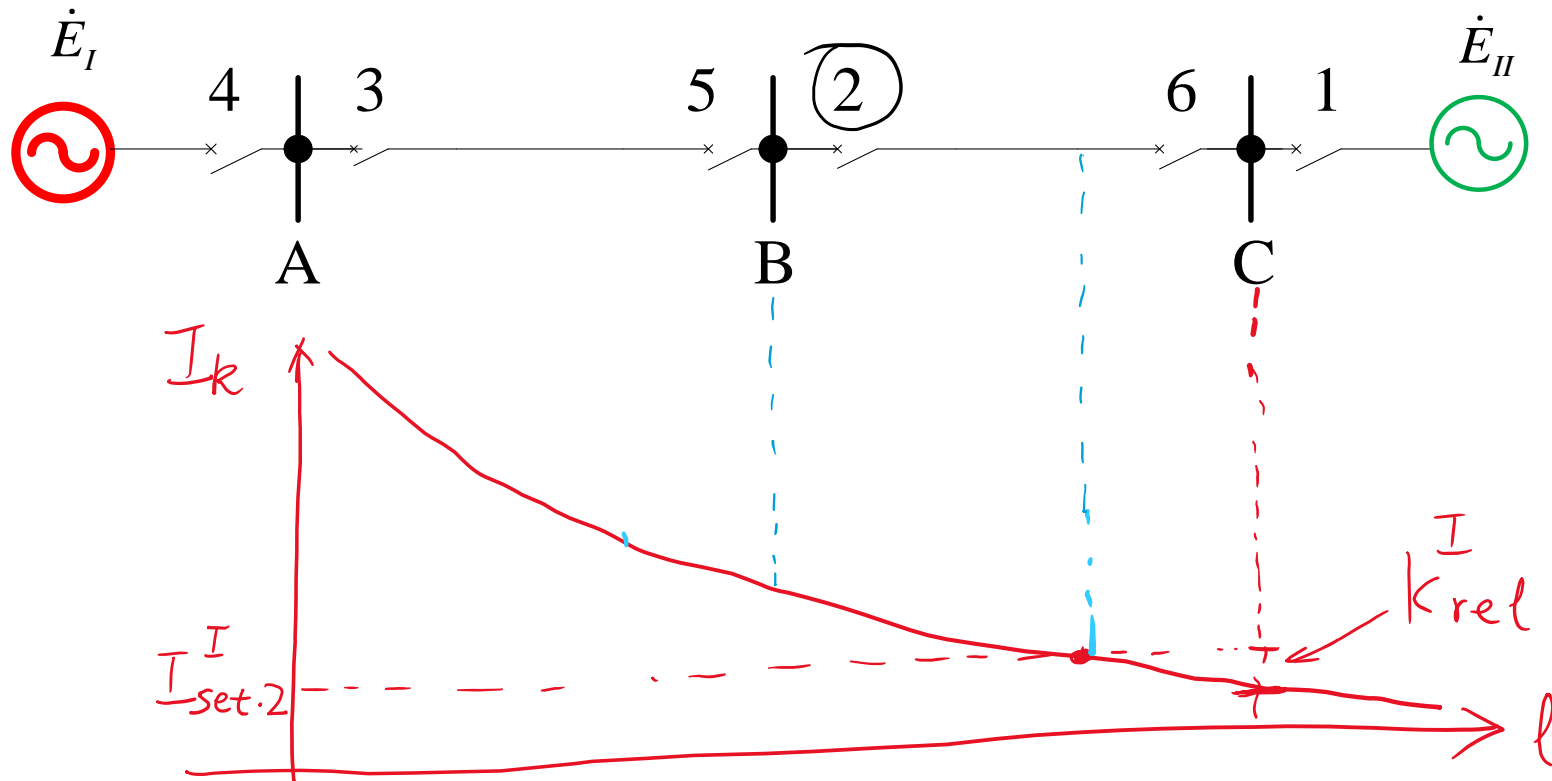
双侧电源网络对电流保护的影响



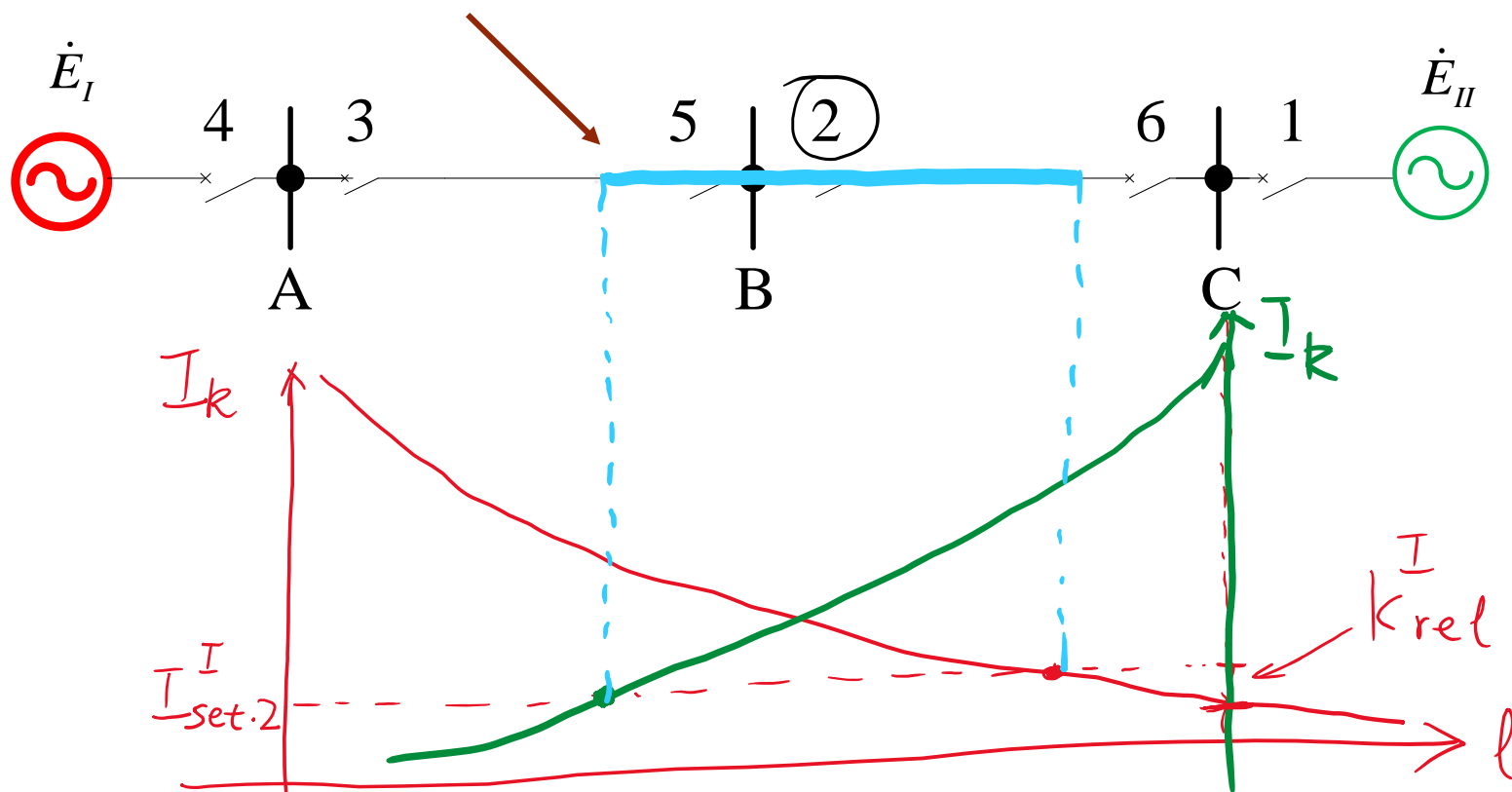
- ⦿ 电网结构从单侧电源变为双侧电源，对保护有何影响？
 - 短路电流方向不再单一（需要定义参考方向，或正方向）
 - 线路保护系统的配置发生变化（线路两侧皆要配置）
 - 电流保护可能不正确动作（没有能力区分短路电流方向）



保护2电流I段的动作范围



保护2电流I段的动作范围



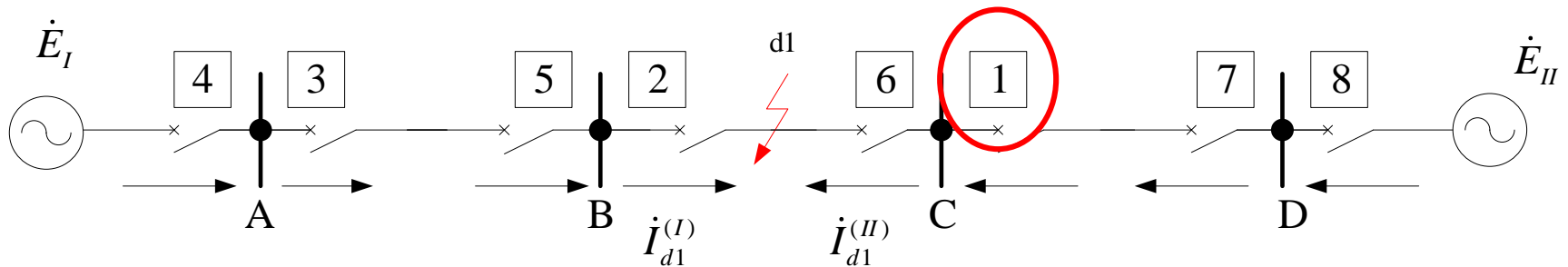
思考：在反方向故障时，电流保护一定会误动吗？



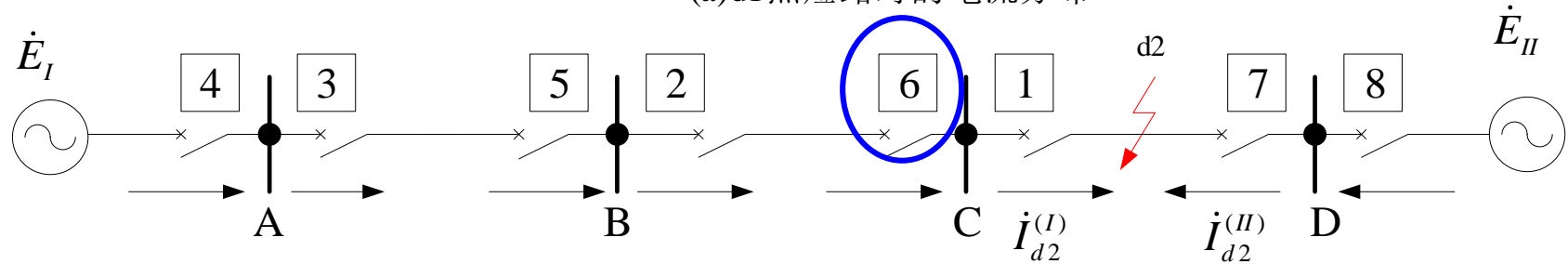
电流速断保护存在的问题



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



(a) d1点短路时的电流分布



(b) d2点短路时的电流分布

d1点短路时，如果 $\dot{I}_{d1}^{(I)} > I'_{act.1}$ ，则保护1的速断保护会误动作

d2点短路时，如果 $\dot{I}_{d2}^{(I)} > I'_{act.6}$ ，则保护6的速断保护会误动作

观察：短路电流方向（功率方向）与参考方向相反时可能误动

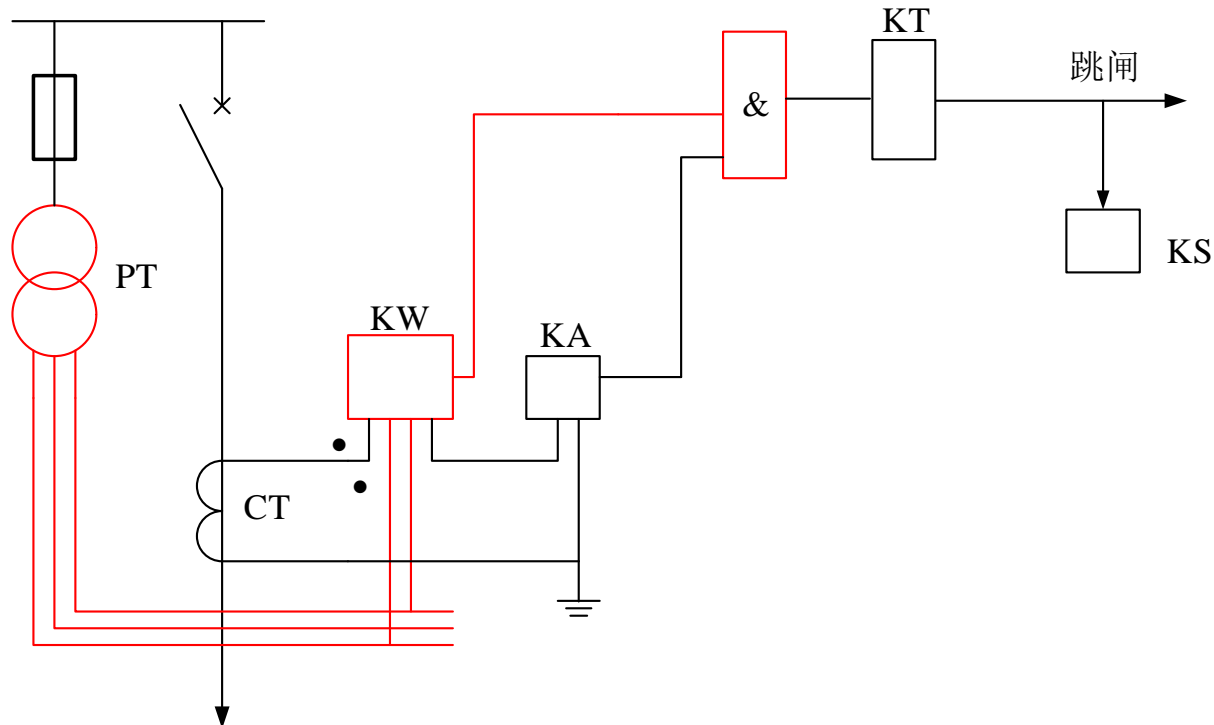
解决方法:方向性电流保护



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

■ 方向性电流保护 = 电流保护 + 功率方向继电器

➤ 当保护反方向故障时，由功率方向继电器闭锁电流保护

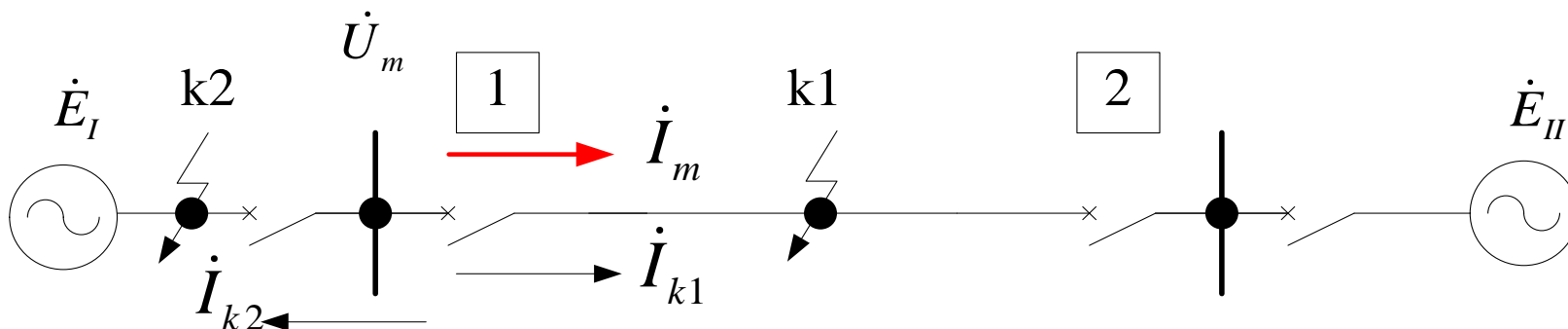




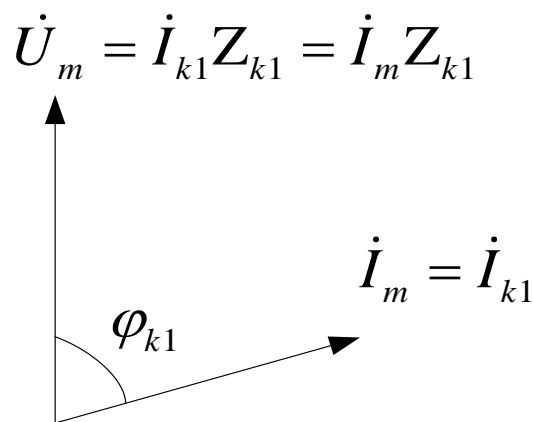
2.2.2 功率方向继电器的工作原理



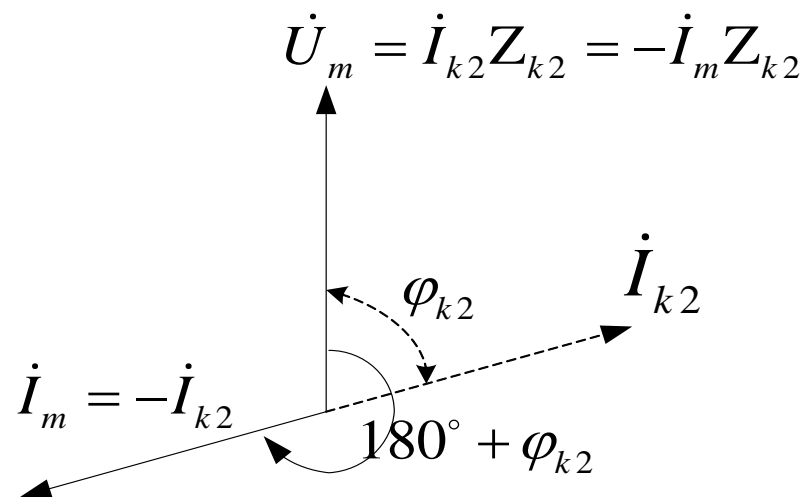
正、反方向短路时电压电流相位特征



\dot{i}_m 为继电器的测量电流，红色箭头为其正（参考）方向



(a) 正方向(k1)故障时

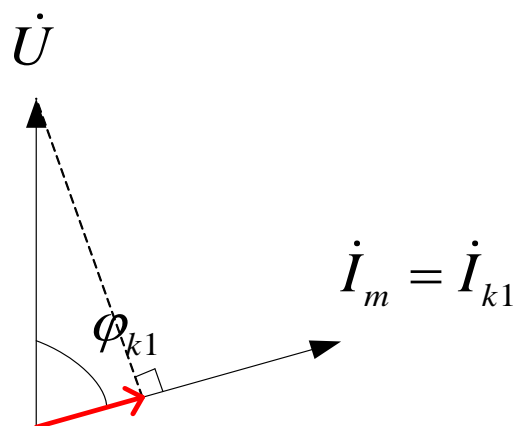
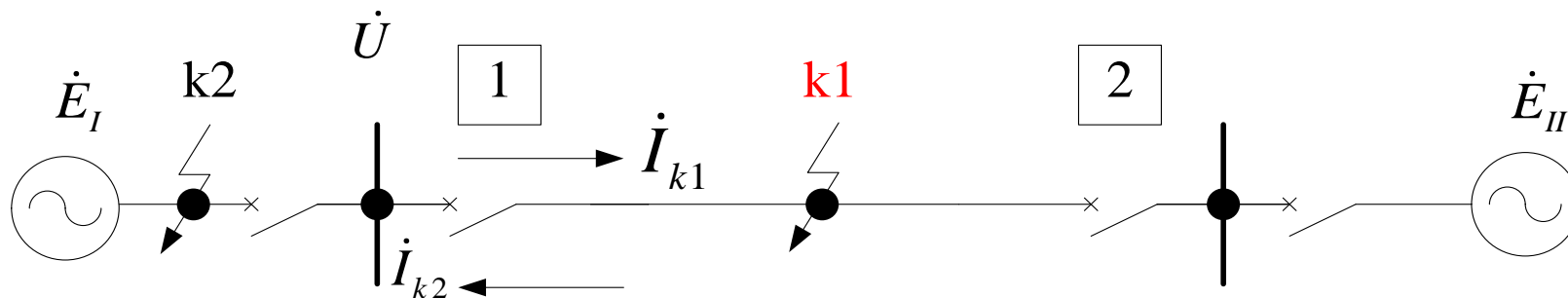


(b) 反方向(k2)故障时

正方向短路时电压电流相位关系



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



测量电压: $\dot{U}_{mA} = \dot{U}_A$

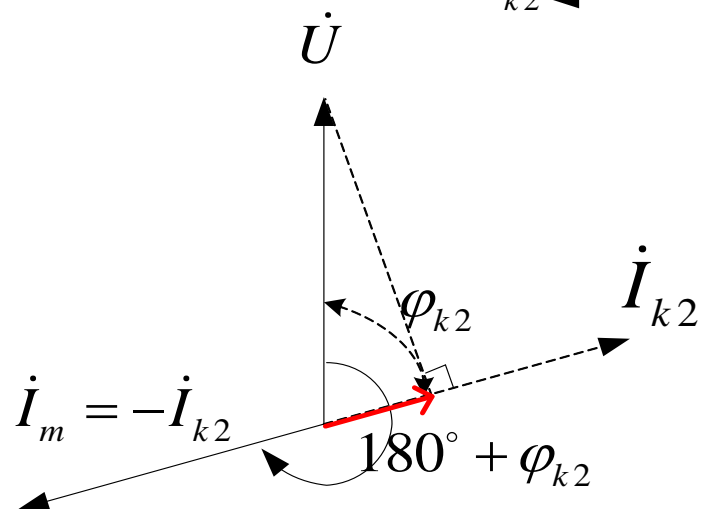
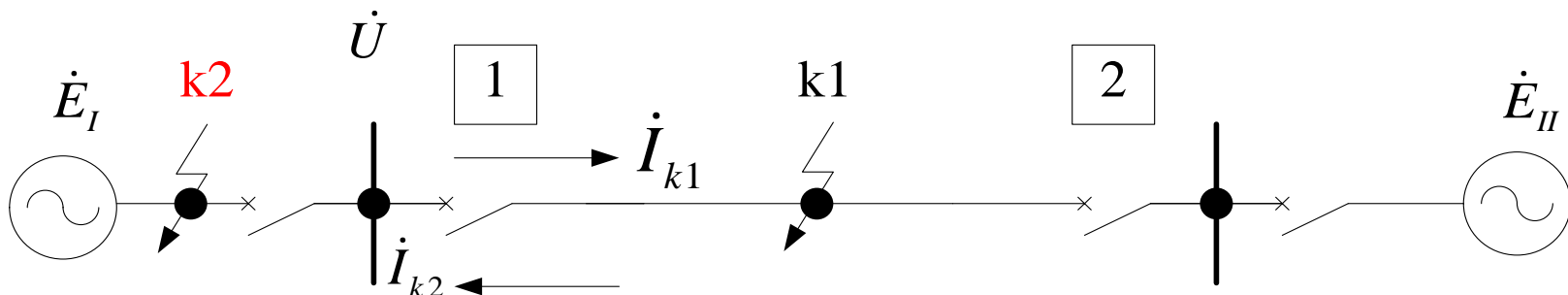
测量电流: $\dot{I}_{mA} = \dot{I}_{k1A}$

测量阻抗角: $\varphi_{mA} = \arg \frac{\dot{U}_{mA}}{\dot{I}_{mA}} = \varphi_{k1}$

相角判据: $0^\circ < \varphi_{mA} < 90^\circ$

功率判据: $\langle \dot{U}_{mA}, \dot{I}_{mA} \rangle = U_{mA} I_{mA} \cos \varphi_{mA} > 0$

反方向短路时电压电流相位关系



$$\varphi_{mA} = \arg \frac{\dot{U}_{mA}}{\dot{I}_{mA}} = \arg \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_{k2A}} = 180^\circ + \varphi_{k2}$$

$$180^\circ < \varphi_{mA} < 270^\circ$$

$$\langle \dot{U}_{mA}, \dot{I}_{mA} \rangle = U_{mA} I_{mA} \cos \varphi_{mA} = U_A I_{k2A} \cos(180^\circ + \varphi_{k2}) < 0$$

功率方向继电器的工作原理



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

正方向和反方向故障时的区别：

- ① 母线电压和短路电流之间的相位关系
- ② 短路功率方向（正负）

➤ **功率方向继电器**：用以判别功率方向或测定电压、电流间相位角的继电器

动作方程（判据）与动作区域



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

功率判据

$$U_m I_m \cos \varphi_m > 0$$

相角判据

$$-90^\circ < \varphi_m < +90^\circ$$

功率方向继电器
动作方程

动作方程（判据）与动作区域



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

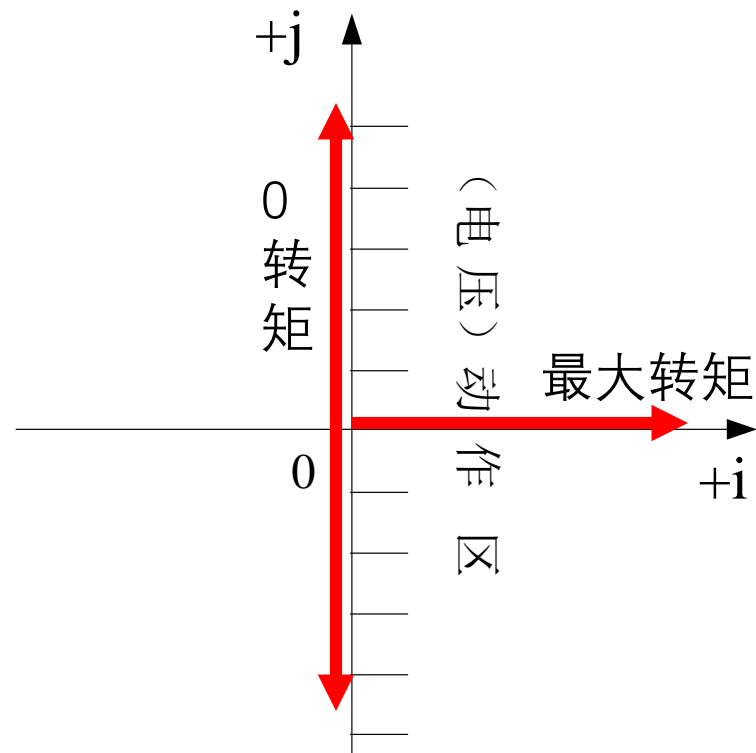
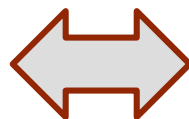
功率判据

$$U_m I_m \cos \varphi_m > 0$$

相角判据

$$-90^\circ < \varphi_m < +90^\circ$$

功率方向继电器
动作方程



功率方向继电器
动作区域

对功率方向继电器的要求



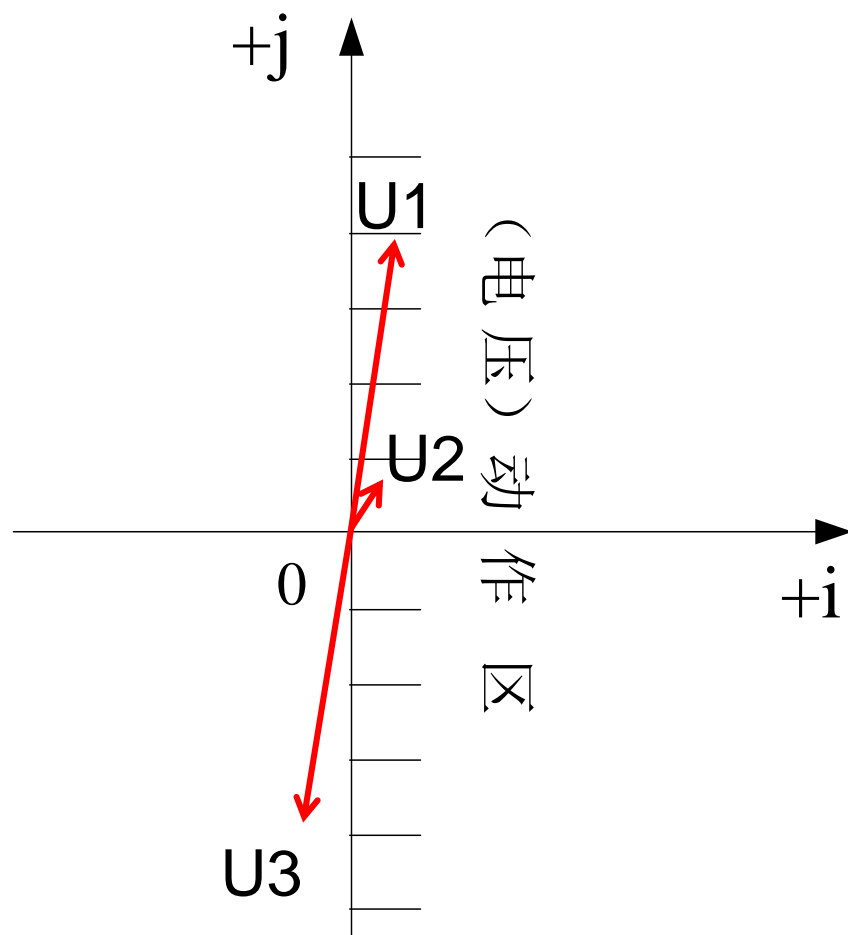
$$U_m I_m \cos \varphi_m > 0$$

- ④ 对功率方向继电器有如下基本要求：
 1. 正方向任何类型的短路故障都能动作，而当反方向故障时则不动作（**选择性**）。
 2. 故障后加入继电器的电流、电压和余弦项应尽可能地大一些，以消除和减小方向元件的死区（**灵敏性**）。
- ④ 那么上述功率方向继电器的基本动作方程是否满足要求呢？



分析U1~U4与下列运行方式的对应关系

1. 本线路末端故障?
2. 本线路反向故障?
3. 本线路出口故障?

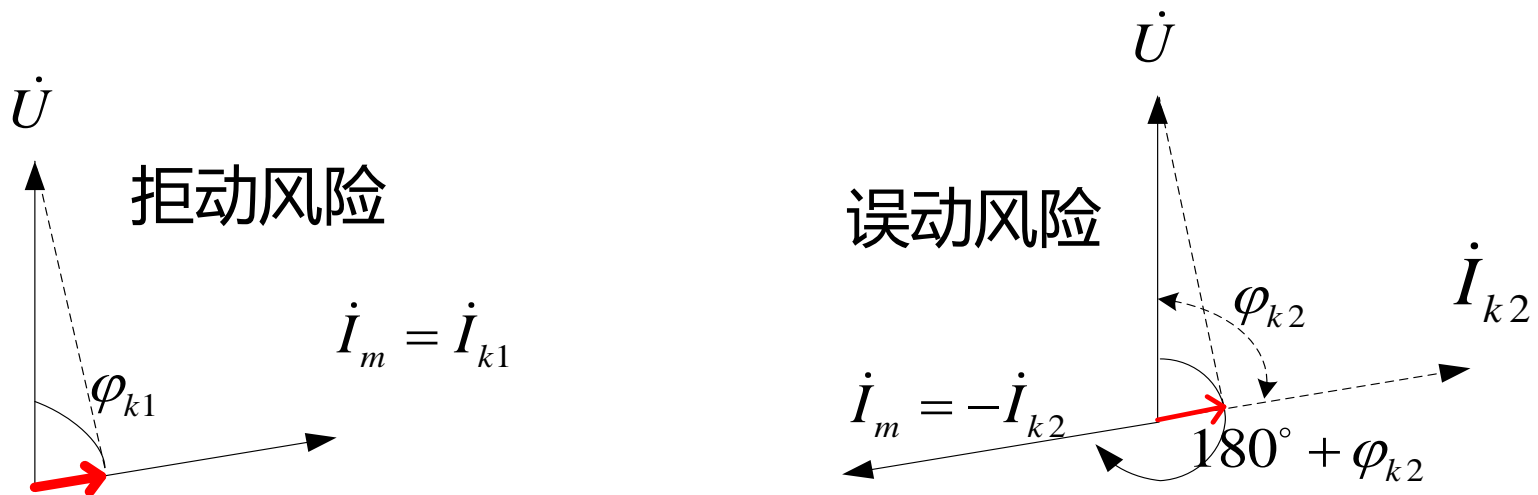


问题 (1) $\cos\varphi_m$



$$\langle \dot{U}_m, \dot{I}_m \rangle = U_m I_m \cos \varphi_m$$

- $\varphi_m \rightarrow \pm 90^\circ$ 时，电压、电流相量接近垂直，其内积接近0。此时，存在拒动或误动风险！

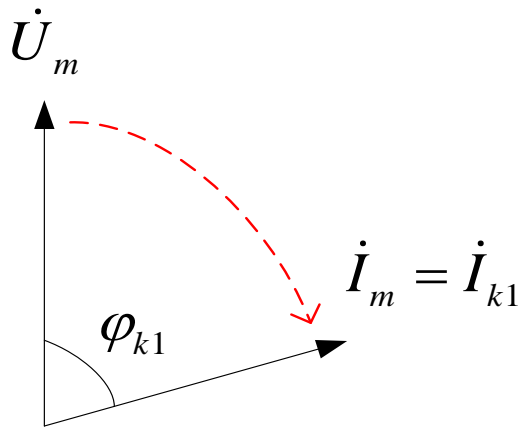


解决方法：旋转测量电压相量



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

- 当测量电压和电流幅值不变时，方向继电器输出随两者间相位角而变化。
- 如将 \dot{U}_m 旋转 $-\varphi_{k1}$ ，再与 \dot{I}_m 比相，则功率方向继电器将最为灵敏（选择性也更好）



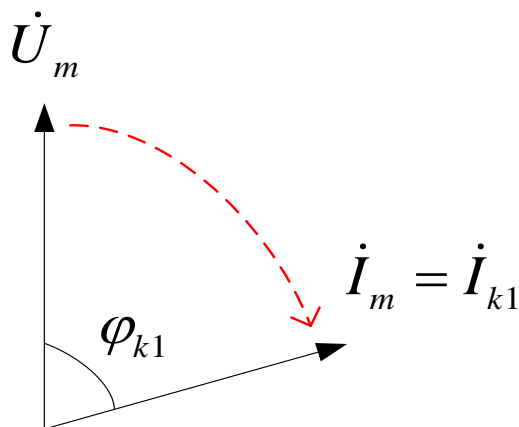
正向故障

解决方法：旋转测量电压相量

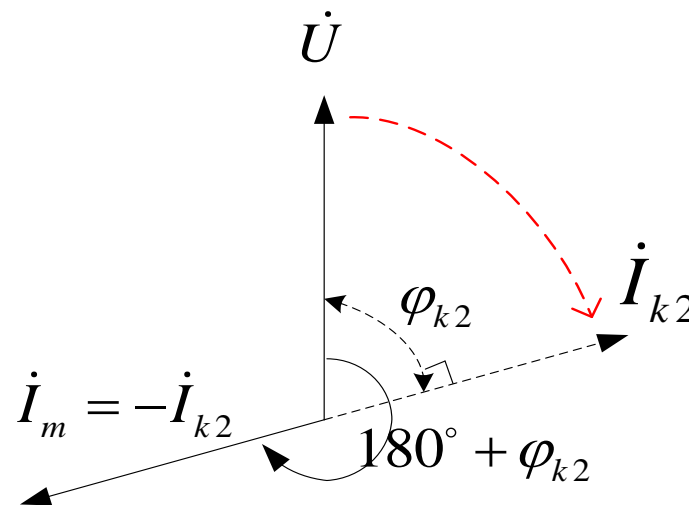


上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

- 当测量电压和电流幅值不变时，方向继电器输出随两者间相位角而变化。
- 如将 \dot{U}_m 旋转 $-\varphi_{k1}$ ，再与 \dot{I}_m 比相，则功率方向继电器将最为灵敏（选择性也更好）



正向故障



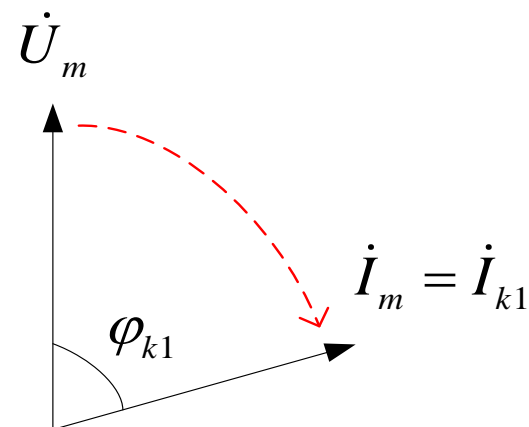
反向故障

解决方法：旋转测量电压相量



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

- 如将 \dot{U}_m 旋转 $-\varphi_{k1}$ ，再与 \dot{I}_m 比相，则功率方向继电器将最为灵敏
- 动作判据发生如下变化



解决方法：旋转测量电压相量



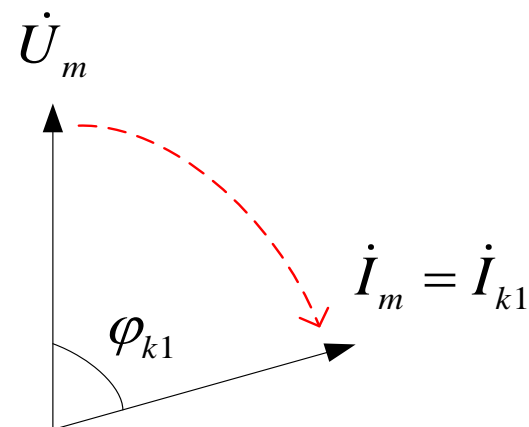
上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

- 如将 U_m 旋转 $-\varphi_{k1}$ ，再与 I_m 比相，则功率方向继电器将最为灵敏
- 动作判据发生如下变化

$$-90^0 < \arg \frac{\dot{U}_m e^{-i\varphi_{k1}}}{\dot{I}_m} < +90^0$$

$$\Leftrightarrow \varphi_{k1} - 90^0 < \arg \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} < \varphi_{k1} + 90^0$$

$$\Leftrightarrow U_m I_m \cos(\varphi_m - \varphi_{k1}) > 0$$

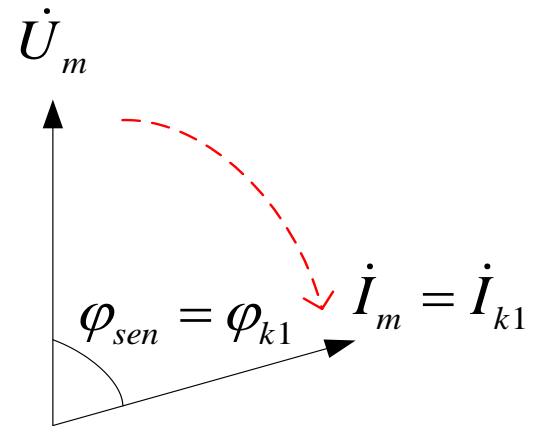


最大灵敏角



- 但 φ_{k1} 并非预先可知。实用中，可取一个预设的定值作为最大灵敏角。
- 定义：当测量电压和电流幅值不变时，方向继电器输出为最大时的相位角称为**最大灵敏角** φ_{sen}
- φ_{sen} 是功率方向继电器最重要的**定值**。

$$U_m I_m \cos(\varphi_m - \varphi_{k1}) > 0$$



最大灵敏角



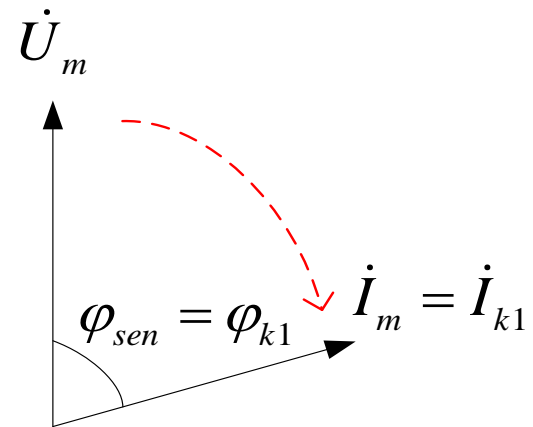
- 但 φ_{k1} 并非预先可知。实用中，可取一个预设的定值作为最大灵敏角。
- 定义：当测量电压和电流幅值不变时，方向继电器输出为最大时的相位角称为**最大灵敏角** φ_{sen}
- φ_{sen} 是功率方向继电器最重要的**定值**。

$$U_m I_m \cos(\varphi_m - \varphi_{k1}) > 0$$



$$U_m I_m \cos(\varphi_m - \varphi_{sen}) > 0$$

$$\Leftrightarrow \varphi_{sen} + 90^\circ > \arg \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} > \varphi_{sen} - 90^\circ$$



功率判据

$$U_m I_m \cos(\varphi_m - \varphi_{sen}) > 0$$

相角判据

$$\varphi_{sen} + 90^\circ > \arg \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} > \varphi_{sen} - 90^\circ$$

功率方向继电器
动作方程

继电器的动作区域



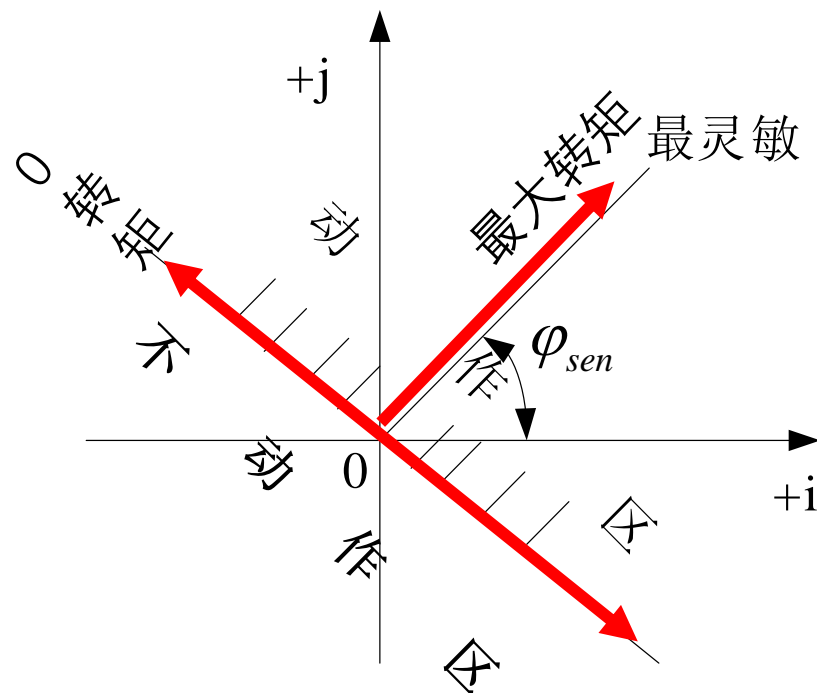
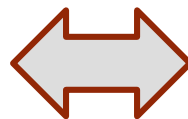
上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

功率判据

$$U_m I_m \cos(\varphi_m - \varphi_{sen}) > 0$$

相角判据

$$\varphi_{sen} + 90^\circ > \arg \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} > \varphi_{sen} - 90^\circ$$



功率方向继电器
动作方程

功率方向继电器
(电压) 动作区域



1. 设最大灵敏角 $\phi_{sen} = 60^\circ$ ，线路阻抗角为 80° ，则在正向（反向）发生发生三相短路时，
 - 请给出B相继电器的功率判据表达式
 - 在动作区域平面上绘制测量电压位置
2. 当系统正常运行时，方向继电器的触点是否闭合？