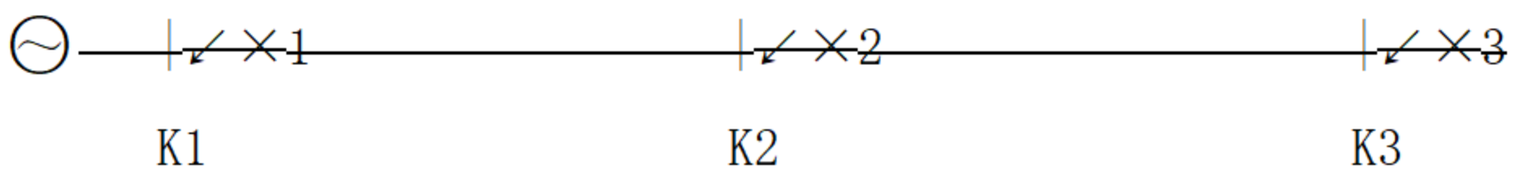
电力系统继电保护原理

【案例 01】如图所示单侧电源辐射网中，线路保护 1 方案拟定为三段式电流保护，拟采用两相不完全星形接线。已知线路 1 的最大负荷电流为 90A，在最大和最小运行方式下，K1、K2 及 K3 点发生三相短路时电流值见下表。线路保护 2 的过电流保护的动作时间为 1.5s。试对保护 1 的一、二、三段电流保护的动作电流、动作时间进行整定及灵敏度校验。(可靠系数：一段为 1.3，二段 1.1，三段 1.2。自启动系数为 1.5，返回系数为 0.85，Δt=0.5s)

短路点	K1	K2	K3
最大运行方式下三相短路电流(A)	2520	750	300
最小运行方式下三相短路电流(A)	1654	650	270



解：计算(最不利)最小运行方式下两相短路电流，用于校验灵敏度：

$I^{(2)}_{K1.min}$ =1654*$\frac{\sqrt{3}}{2}$ =1432A

$I^{(2)}_{K2.min}$ =650*$\frac{\sqrt{3}}{2}$ =563A

$I^{(2)}_{K3.min}$ =270*$\frac{\sqrt{3}}{2}$ =234A

保护 1 的Ⅰ段定值=可靠系数*本级末端最大短路 I=$I^{I}_{set.K1}=K^{I}_{rel}*I^{(3)}_{max}$ =1.3*750=975A，t=0s

保护 2 的Ⅰ段定值=可靠系数*本级末端最大短路 I=$I^{I}_{set.K2}=K^{I}_{rel}*I^{(3)}_{max}$ =1.3*300=390A，t=0s

保护 1 的Ⅱ段定值=可靠系数*下一级Ⅰ段定值=$I^{II}_{set.K1}=K^{II}_{rel}*I^{I}_{set.K2}$ =1.1*390=429A，t=0.5s

保护 1 的Ⅲ段定值=$\frac{可靠系数*启动系数}{返回系数}$*最大负荷 I=$I^{III}_{set.K1}$ =(1.2*1.5/0.85)*90=191A，t=1.5+0.5=2s

保护 1 的Ⅰ段灵敏性$K^{I}_{sen.K1}$=1432/975=1.47＜1.5 不满足

保护 1 的Ⅱ段灵敏性$K^{II}_{sen.K1}$=563/429=1.31＞1.3 满足

（近后备）保护 1 的Ⅲ段灵敏性$K^{III}_{sen.K1}$=563/191=2.95＞1.5 满足

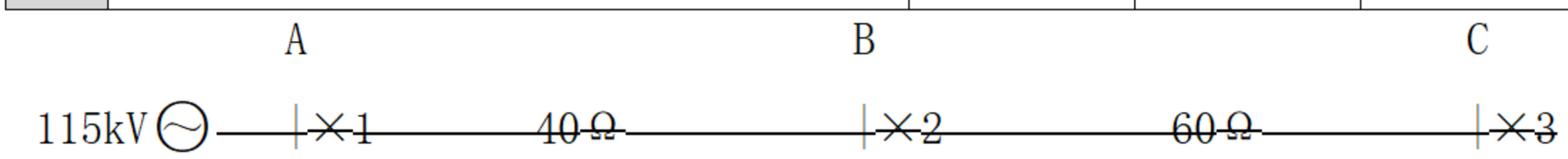
（远后备）保护 1 的Ⅲ段灵敏性$K^{III}_{sen.K1}$=234/191=1.23＞1.2 满足

【案例 02】1.系统接线如图所示，线路 AB 的最大负荷电流为 150A，保护 3 的定时限过电流保护时限为 0.5 秒， Δt=0.5 秒，各母线短路时流过保护 1 的一次电流如表 1；

已知:电源 Xsmax=12Ω，Xsmin=10Ω，K_{rel}^{I}=1.3，K_{rel}^{II}=1.1，K_{rel}^{III}=1.2，K_{ssl}1.4，K_{re}=0.85，试对保护 1 的三段电流保护进行整定计算。

(要求:Lmin%〉15%，Lman%〉50%，K_{sen}^{II}>1.2，$K_{sen.近}^{III}$>1.3，$K_{sen.远}^{III}$>1.2)

表 1	短路点	A	B	C
	最大运行方式下三相短路电流(kA)	6.64	1.328	0.604
	最小运行方式下两相短路电流(kA)	4.792	1.106	0.513



保护 1 的 I 段定值=$I_{set.A}^{I}=K_{rel}^{I}*I_{max}^{(3)}$=1.3*1.328=1.726kA，t=0s

保护 2 的 I 段定值=$I_{set.B}^{I}=K_{rel}^{I}*I_{max}^{(3)}$=1.3*0.604=0.785kA，t=0s

保护 1 的 II 段定值=$I_{set.A}^{II}=K_{rel}^{II}*I_{set.K2}^{I}$=1.1*0.785=0.864kA，t=0.5s·

保护 1 的III段定值=$I_{set.A}^{III}$=(1.2*1.4/0.85)*150=296.5A，t=1.5s

保护 1 的 II 段灵敏性$K_{sen.A}^{II}$=1.106/0.864=1.28＞1.2 满足

（近后备）保护 1 的III段灵敏性$K_{sen.A}^{III}$=1.106/0.2965=3.73＞1.3 满足

（远后备）保护 1 的III段灵敏性$K_{sen.A}^{III}$=0.513/0.2965=1.73＞1.2 满足

保护 1 的 I 段最小保护范围 Lmin%，发生在 Xsmax=12Ω 的最小运行方式下且 f(2)故障时。设最小保护范围距离 A 母线电抗未 Xmin，代入公式：$\frac{115}{\sqrt{3}*(Xsmax+Xmin)}*\frac{\sqrt{3}}{2}$=1.726kA，

解得 Xmin=21.314Ω，Lmin%=21.314/40*100%=53.3%＞15%满足

保护 1 的 I 段最大保护范围 Lman%，发生在 Xsmin=10Ω 的最大运行方式下且 f(3)故障时。设最大保护范围距离 A 母线电抗未 Xman，代入公式：$\frac{115}{\sqrt{3}*(Xsmin+Xman)}$=1.726kA，

解得 Xman=28.47Ω，Lmin%=28.47/40*100%=71.18%＞50%满足

【拓展 01】继保的基础元件-电流互感器(5A、1A)工作原理

（1）nTA=I1/I2，$S_{2n}=I2n^2*Z_{2L}$

（2）减极性标注：一次侧电流 P1 进 P2 出，二次侧电流 S1 出 S2 进，I1 和 I2 电流方向一致。

（3）误差根本原因：励磁电流 Im 的存在。

①短路电流越大，Im 分流越大，误差越大；②饱和后励磁 Xm↓，对应 Im↑，误差越大。

（4）设计选型：①变比越大，误差越小；②电缆截面越大，误差越小；③电缆越短，误差越小；伏安特性试验可以验证互感器的精度等技术指标是否符合要求。

（5）误差曲线（5%、10%两种）：

①物理本质反映铁芯抗饱和能力，误差主要源于励磁电流增大导致的复合误差（含比差和角差 7° 内），非单纯稳态比值误差。

②CT 铭牌标注 5P10：5 表示复合误差限值为 5%；字母 P 代表保护用途；③数字 10 是准确限值系数，表示当一次电流达到额定电流 10 倍时仍能保持误差≤5%。

【拓展 02】继保的基础元件-电压互感器（100V）工作原理

（1）nTV=U1/U2，$S_{2n}=U2n^2*Z_{2L}$

（2）减极性标注：一次侧电流 A 进 X 出，二次侧电流 a 出 x 进。

（3）误差根本原因：漏抗 Zm 压降的存在。正常工作于开路，二次带载 Z 越小，误差越大。

【拓展 03】继保的基础元件-继电器工作原理

（1）继电器是当输入量（激励量）的变化达到规定要求时，在电气输出电路中使被控量发生预定的阶跃变化的一种电器。

①KA 动作时：电磁力矩 Me≥摩擦力矩 Mf+弹簧力矩 MT

②KA 动作时：弹簧力矩 MT≥摩擦力矩 Mf+电磁力矩 Me

③返回系数 Kre=返回值/动作值，过量型 Kre 一般取 0.85~0.95，欠量型 Kre 一般取 1.15~1.25。

【拓展 04】环网的定时限过流保护可以不装方向元件的情况。

①环外的保护；

②同一母线时间长的保护；

③环网电源测的保护。

【拓展 05】同一母线上的保护可以不装方向元件的情况。

①动作时间长的可以不装(定时限过电流 $t^{Ⅲ}$时间)；

②整定值大的可以装；

③不存在反方何误动不装。

【拓展 06】功率方向继电器工作原理

（1）电磁力矩 M=K*Um*Im*cosΦm　　Φm =Arg（$\dot{U}$m，$\dot{I}$m）

①当 cosΦm＞0 时，即 M＞0 继电器动作；当 cosΦm=1 时，即 Mmax 最灵敏动作；

②当 cosΦm＜0 时，即 M＜0 继电器返回；当 cosΦm=-1 时，即-Mmax 最灵敏返回；

（2）$\dot{I}$m 规定母线流向线路为正方向，$\dot{U}$m 规定大地为参考零电位；

（3）Φm 正负规定：$\dot{I}$m 滞后$\dot{U}$m 为正，Φm＞0；$\dot{I}$m 超前$\dot{U}$m 为负，Φm＜0。

（4）90°接线可以提高动作灵敏性，以线路阻抗角Φk 取 70°为例对比动作灵敏性：

①0°接线时，Φm=Φk=70°，cosΦm=cos70°=0.342＞0 动作

②90°接线时，Φm=-（90-Φk）=-（90-70）=-20°，cosΦm=cos（-20°）=0.94＞0 动作

（5）90°接线时，再设置内角α可以使动作灵敏性最大：

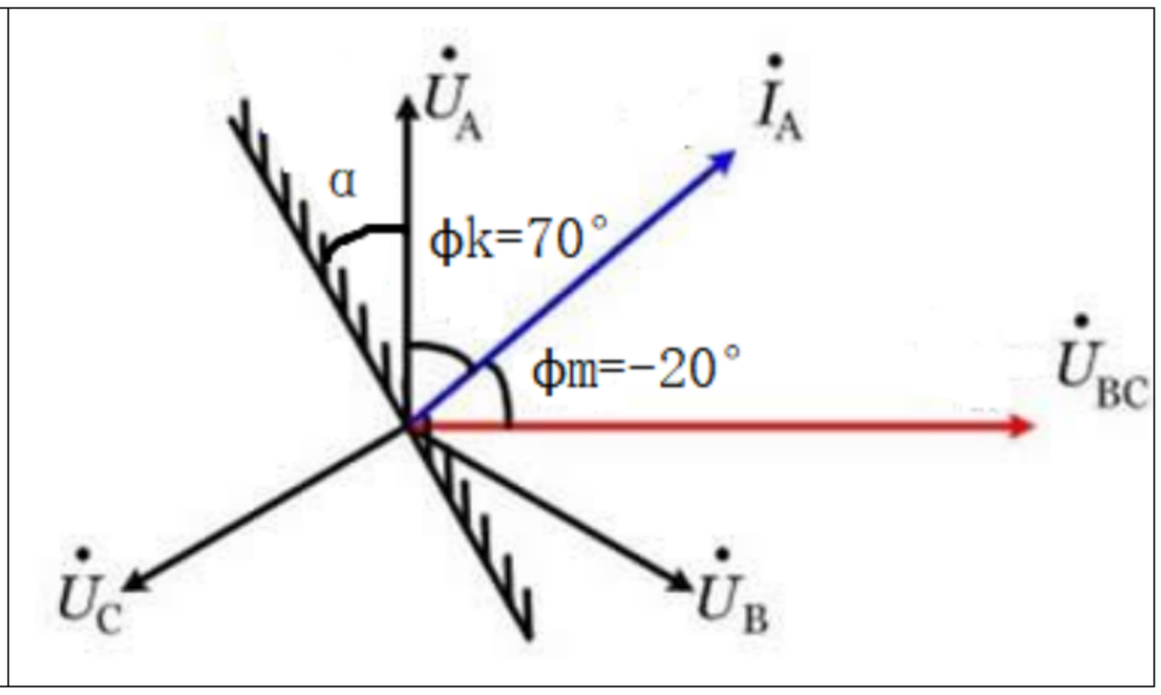
①α正负规定：逆时针为正，顺时针为负。

②将 U_{BC} 电压逆时针旋转 20°，即α=20°，cosΦm=cos（-20° +20°）=1＞0 最灵敏动作

③高压电气试验灵敏角校验时，Φm 的动作边界为 110~-70°。

90°接线

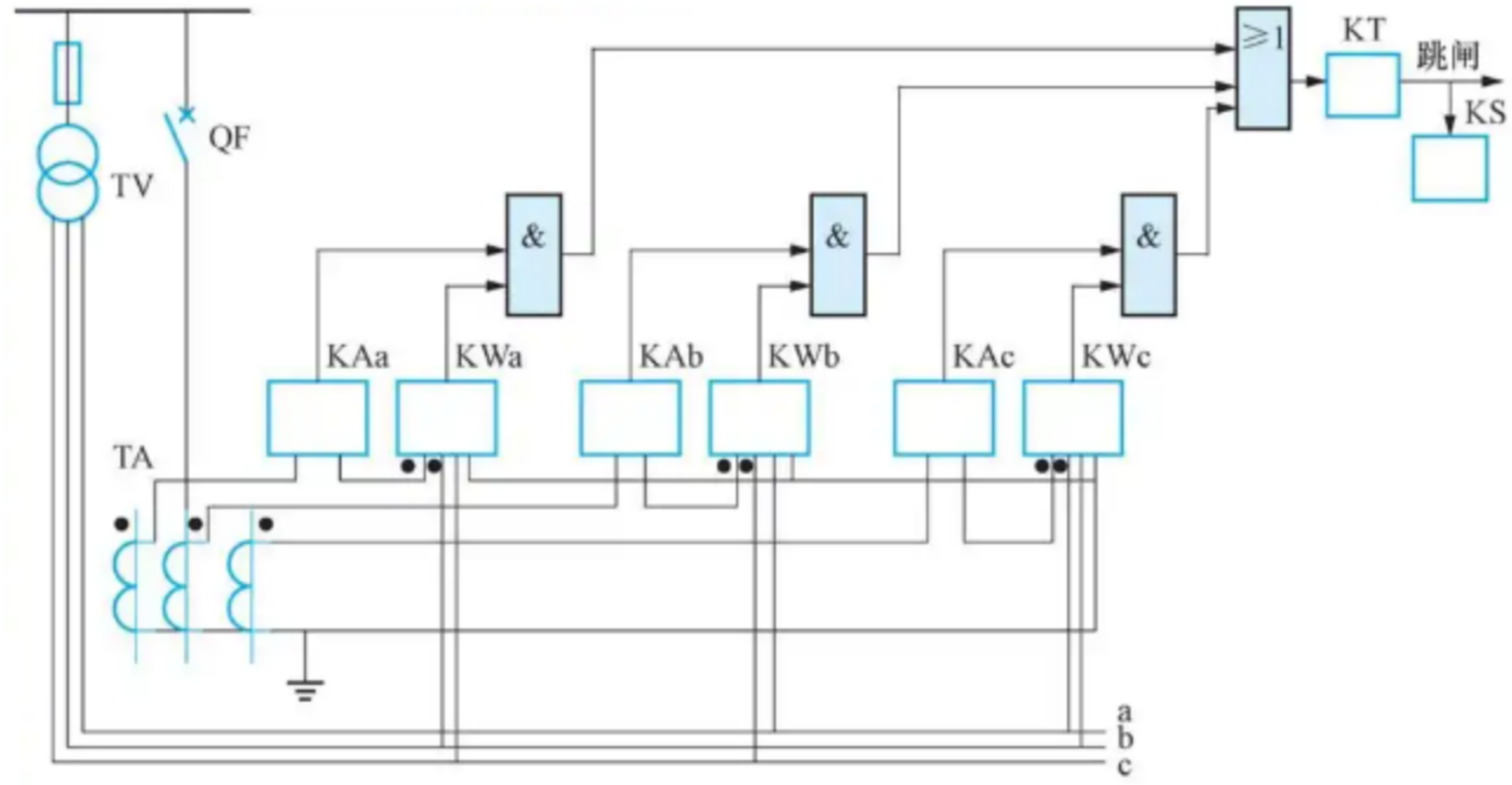
继电器	$\dot{I}$m	$\dot{U}$m
KWA	$\dot{I}$A	$\dot{U}$BC
KWB	$\dot{I}$B	$\dot{U}$CA
KWC	$\dot{I}$C	$\dot{U}$AB



④90°接线能消除 f(2)故障死区，不能消除 f(3)故障死区，引入记忆回路解决；

⑤功率方向元件的潜动：功率方向继电器潜动是指继电器仅加入电压或电流一个电量就会动作的现象。只加电流不加电压时所产生的潜动称为电流潜动。只加电压不加电流时所产生的潜动称为电压潜动。潜动的原因由于磁路不双称及剩磁作用。

⑥功率方向继电器要求按相起动接线，如下图：相间短路功率方向判别元件的接线方式。

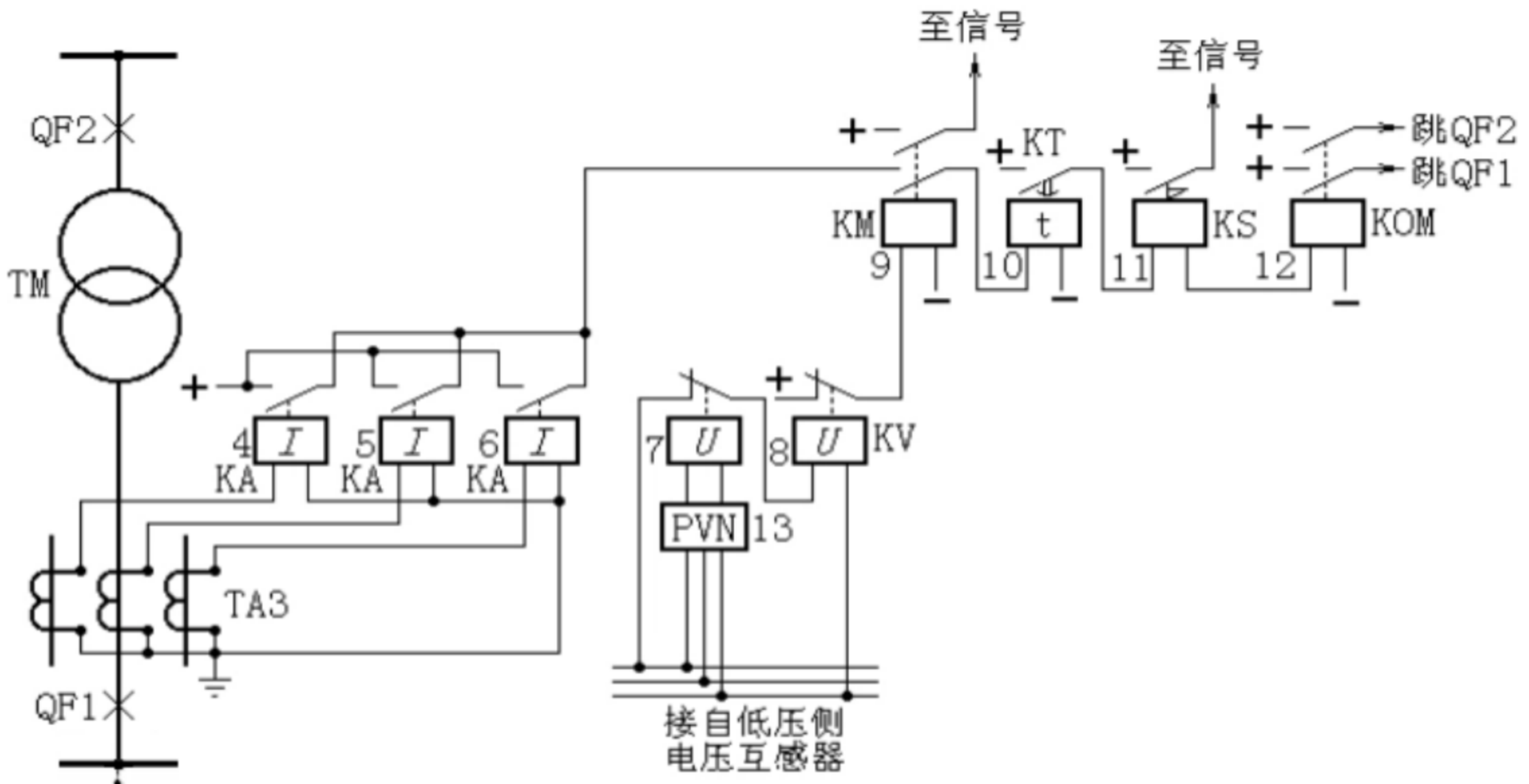


【案例 03】功率方向继电器采用 90° 接线，f(3)故障后动作区为 A 相电流滞后 A 相电压 30°~210° 。则内角 α 为(A)，最灵敏角 Φm(D)

A、-30° B、60° C、-60° D、30°

【拓展 06】复合电压启动的过电流保护原理：

（1）复合电压保护 = 过电流元件 ∧（低电压元件 ∨ 负序电压元件）+ 延时



当保护区内发生不对称故障，系统出现负序电压，负序过滤器 13 有电压输出使继电器 7 常闭触点打开，欠压继电器 8 失压，常闭触点闭合，接通中间继电器 9，若电流继电器 4、5、6 任何一个动作，则启动时间继电器 10，经过整定时限后，跳开两侧断路器。在对称短路情况下，电压继电器 7 不启动，但欠压继电器 8 因电压降低，常闭触点接通，保护启动。

（2）相比单纯过电流保护的优势：

对比项	单纯过电流保护	复合电压启动过电流保护
灵敏度	按最大负荷电流整定，灵敏度低	电压元件闭锁，电流定值可大幅降低
选择性	仅靠时间级差	电压+电流双重判据，选择性好
反应速度	需较长延时躲负荷	故障时电压下降快，可更快启动
不对称故障	灵敏度不足	负序电压元件对不对称故障极灵敏

【拓展 07】零序分量的特性：

1、故障处零序电压最高，变压器中性点处零序电压降为 0；

2、与电源数目及位置无关，取决于变压器中性点接地运行方式(接地点数量及接地点分布）有关；

3、零序电压与零序电流之间的相位关系取决于该点背后零序阻抗的阻抗角与被保护线路无关；

4、零序功率方向与正序功率方向相反：区内故障时，零序功率方向由线路流向母线为正；

5、故障发生在保护安装处附近时、零序功率方向继电器无死区，反而因测得零序电压 3Uo 最大而最灵敏动作。

【拓展 08】大电流接地系统接地故障的零序保护：

零序 I 段定值=$I^{I}_{set.1}=I^{I}_{rel}*3I_{0.max}$，可靠系数$K^{I}_{rel}$=1.3，时间 t=0s

序	3Iomax 选择情况
①	躲开下一级线路出口处 f(1)或 f(1,1)可能出现的最大零序电流 3Io；
②	躲开断路器不同期合闸出现的最大零序电流 3Io；
③	若采用单相重合闸,躲开非全相运行状态下,又发生系统振荡最大 3Io。

按①②二者较大值整定：灵敏 I 段，全相运行下的接地保护；

按③整定：不灵敏 I 段，非全相运行的启动,同时闭锁灵敏 I 段,防止误动。

不灵敏Ⅱ段定值=可靠系数*下一级 I 段定值=$I^{II}_{set.1}=K^{II}_{rel}*I^{I}_{set.2}$，$K^{II}_{rel}$=1.1，t=0.5s

灵敏Ⅱ段定值=可靠系数*下一级Ⅱ段定值=$I^{II}_{set.1}=K^{II}_{rel}*I^{II}_{set.2}$，$K^{II}_{rel}$=1.1，t=1.0s

若保留不灵敏Ⅱ段和灵敏Ⅱ段，即四段式零序保护。

有分支时，$I^{II}_{set.1}=K^{II}_{rel}*I^{I}_{set.2}*K_{F}$，分支系数=$K_{F}$=本级 Io/下一级 Io。

零序Ⅲ段(或叫零序 IV 段)定值=可靠系数*下一系线路出口处最大不平衡电流

$I^{III}_{set.1}=K^{III}_{rel}*3I_{0.unb.max}$，$K^{III}_{rel}$=1.1，近后备$K^{III}_{sen.1}\geqslant 2$，远后备$K^{III}_{sen.1}\geqslant 1.5$。

【拓展 09】零序保护 VS 阶段式电流保护：

1、相间阶段式电流保护受运行方式影响大，零序电流保护受运行方式影响小；

2、零序 I 段比相间 I 段保护范围大；

3、零序III段比相间III段动作时限短；

4、零序电流保护不受振荡影响，相间电流保护受振荡影响；

5、方问性零序电流保护天死区，方同性相间电流保护有死区。

【拓展 08】小电流接地系统接地故障的零序保护：

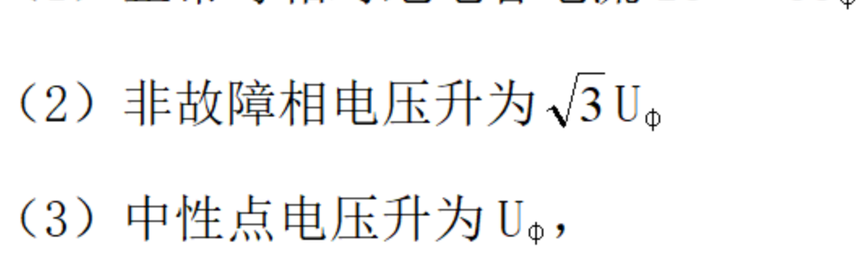
（1）正常每相对地电容电流 $Io=\omega CU_{\phi}$

（2）非故障相电压升为 $\sqrt{3}U_{\phi}$

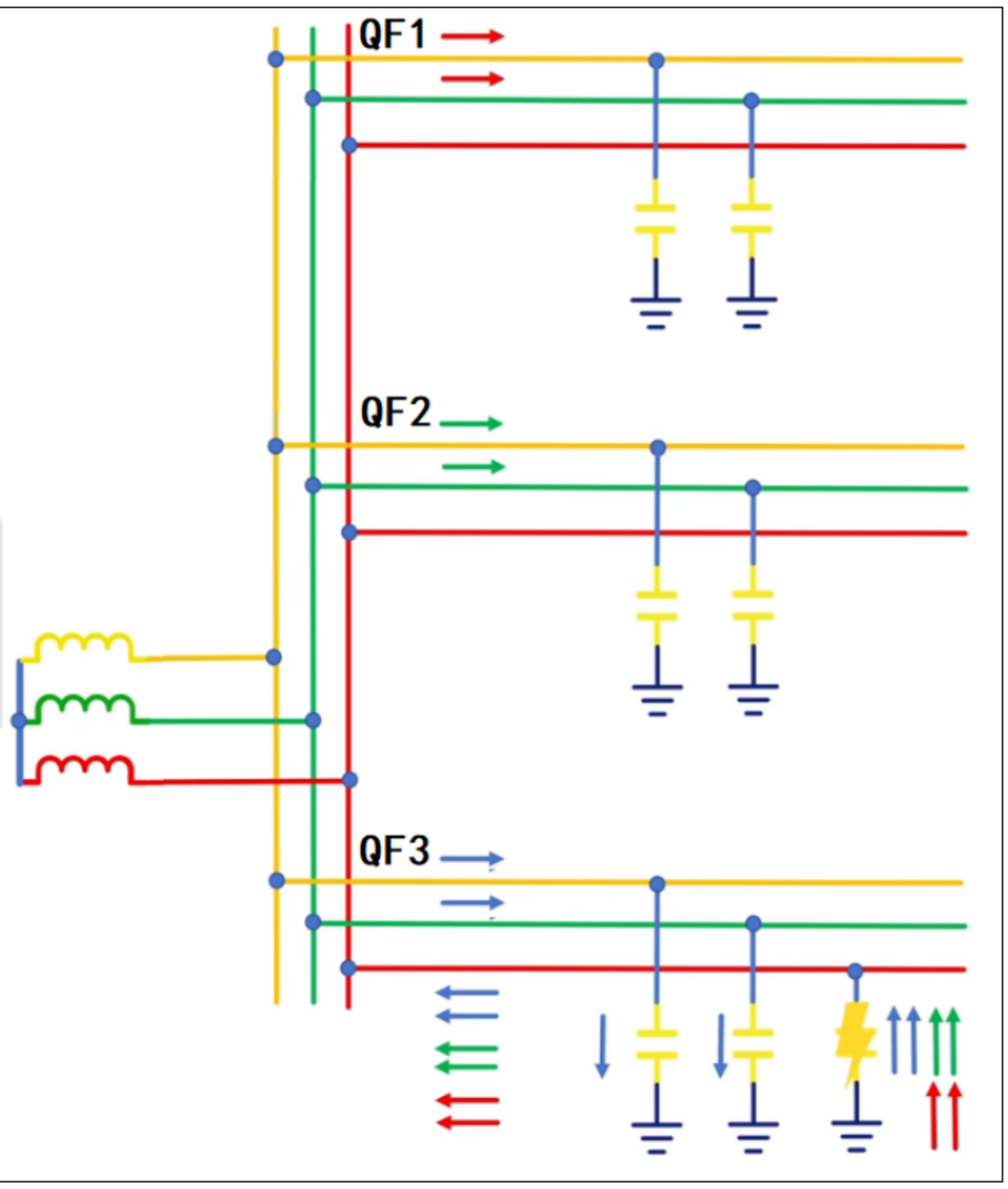
（3）中性点电压升为 U_{ϕ}，

（4）故障电流为 $Ik=n*3\omega CU_{\phi}$，n：为出线数

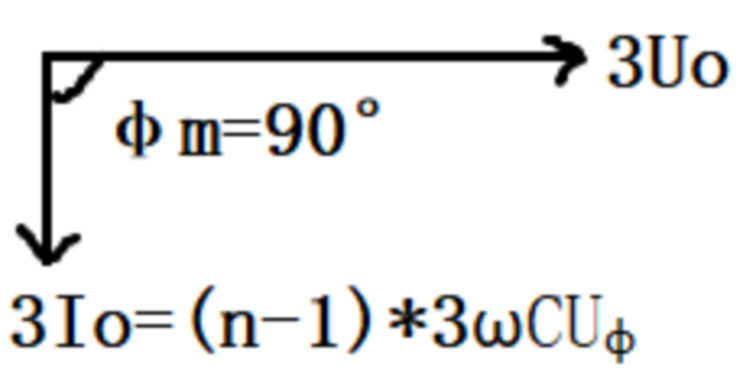
（5）非故障出线保护安装处的零序电流 $3Io=3\omega CU_{\phi}$，零序功率方向为母线流向线路，向量图如下所示：



对地容性电流，电流超前电压 90°



（6）故障出线保护安装处的零序电流 $3Io=(n-1)*3\omega CU_{\phi}$，等于全网非故障出线对地电容电流之和，零序功率方向为线路流向母线，向量图如下所示：



设置内角 $\alpha=-90°$，提高保护灵敏性：

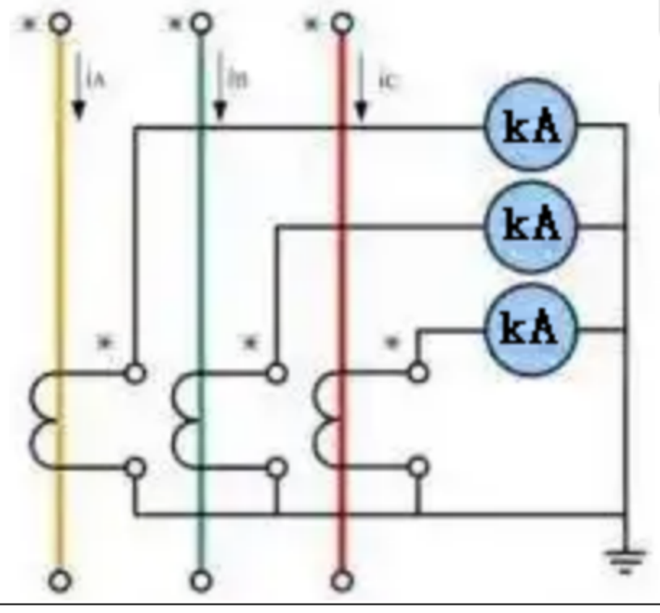
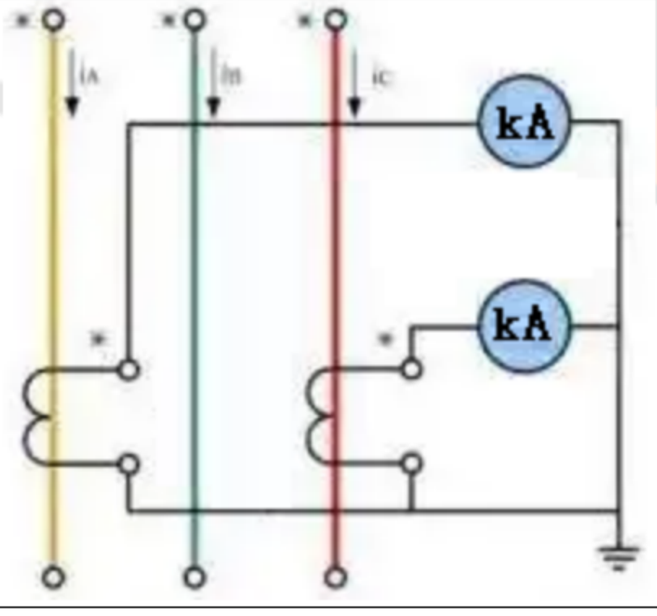
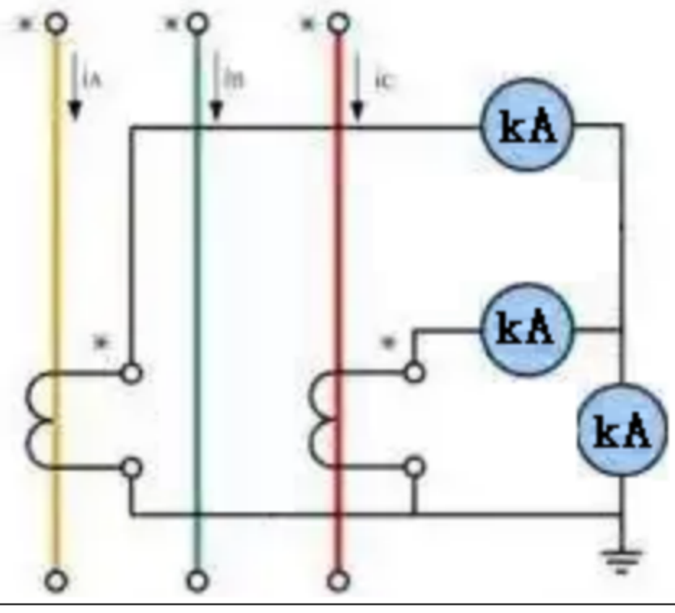
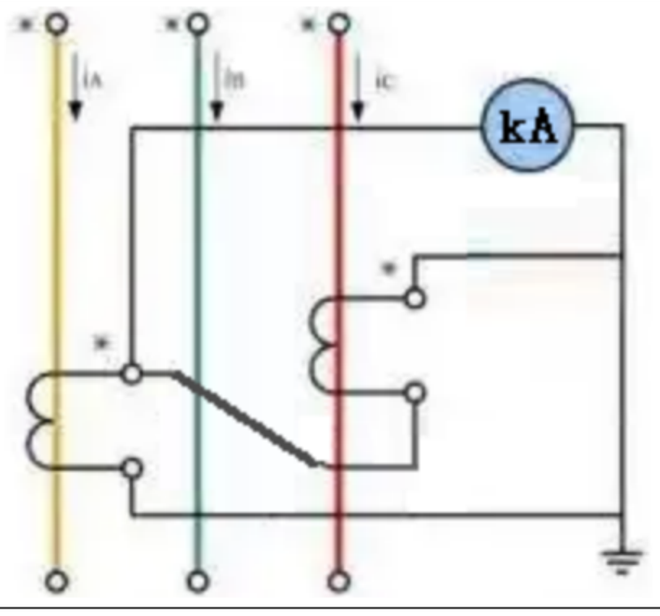
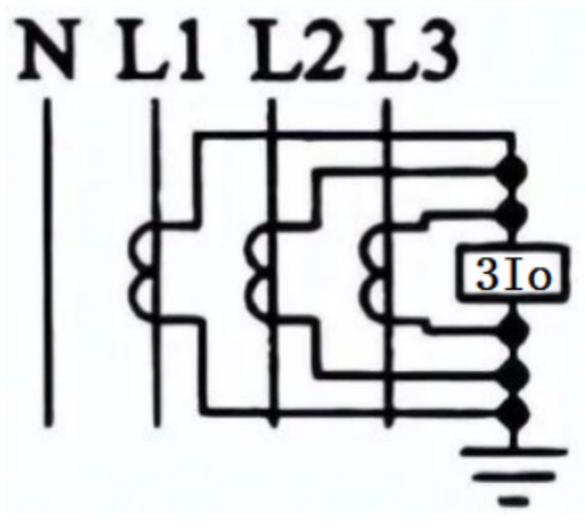
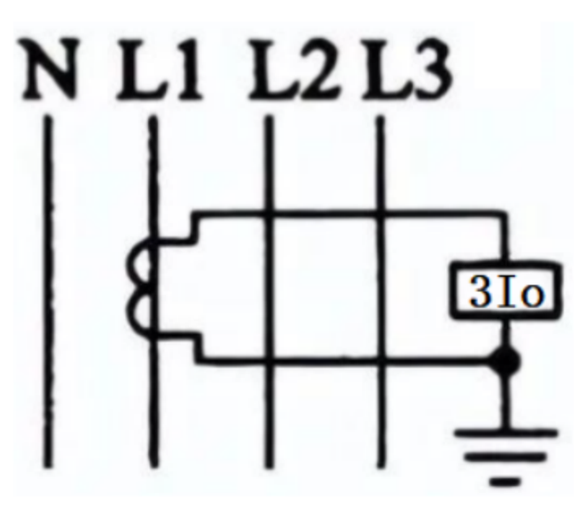
①非故障出线保护 $M=K*Um*Im*\cos(-90°+\alpha)$，$\cos(-90°-90°)=-1<0$ 最灵敏不动作

①故障出线保护 $M=K*Um*Im*\cos(90°+\alpha)$，$\cos(90°-90°)=1>0$ 最灵敏动作

【拓展 09】接地故障保护：

不接地系统接地故障保护：	经消弧线圈接地系统接地故障保护：
（1）绝缘监测装置(无选择性）； （2）零序电流保护，出线 n 越多效果越好(有选择性）； （3）零序功率方向保护，不受出线多少影响，出线少也能灵敏动作(有选择性)。	（1）绝缘监测装置(无选择性)； （2）五次谐波分量接地保护(有选择性)； （3）暂态零序分量首半波接地保护(有选择性）。 注：经消弧线圈过补偿后，零序电流不仅被补偿抵消，且方向反向，无法用零序保护和零序功率方向保护。

【拓展 10】电流互感器接线方式

三相三继电器 **（三相完全星形接线）** 3 个 TA，3 个 KA，4 根电缆 适用发电机、变压器的相间、接地保护。	**两相两继电器** **（两相不完全星形接线）** 2 个 TA，2 个 KA，3 根电缆 适用配电线路的相间保护。	**两相三继电器** **（两相不完全星形接线）** 2 个 TA，3 个 KA，3 根电缆 适用变压器过电流的相间保护。
		
两相电流差 **（两相不完全三角形接线）** 2 个 TA，1 个 KA，2 根电缆 适用 10kV 电动机的相间保护。	**零序电流滤过器** 适用架空线。	**零序电流互感器** 适用电缆。
		

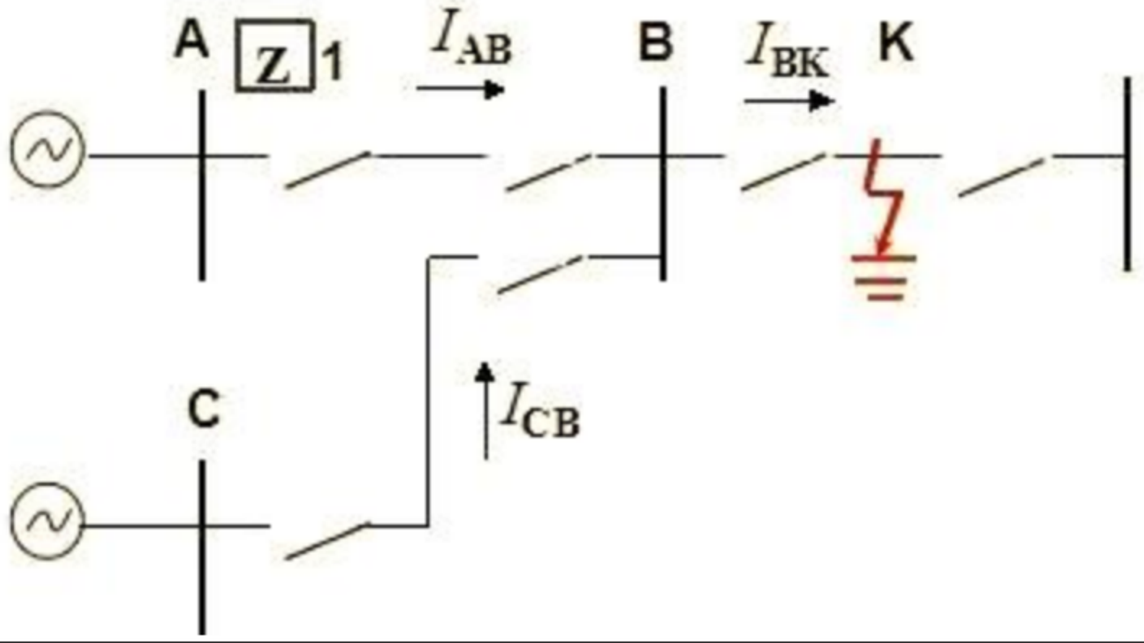
【拓展 11】距离保护原理

距离保护原理：利用保护安装处测量电压和测量电流的比值所构成的继电保护方式称为距离保护，又称阻抗保护，即：$\frac{\dot{U}m}{\dot{I}m}=Zm$，对于输电线路，$\frac{\dot{U}m}{\dot{I}m}=Zm=z_1l_m$

其中，z_1一线路单位长度的正序阻抗；

l_m一短路点的距离(km)，依据测量阻抗的不同，保护能区分出正向区内外或反向故障。

Um 电压的计算	$\dot{U}_m=\dot{U}_f+\dot{I}Z_l$ 其中 $\dot{U}_m$ 为保护安装处母线电压， $\dot{U}_f$ 为故障点电压， $\dot{I}$ 为流过保护的故障 电流， Z_l 为保护安装处到故障点的线路阻抗。
接地故障时	单相接地故障，需考虑零序电流的互感压降影响，引入零序补偿系数。 $\dot{U}_\phi=\dot{U}_{f\phi}+\dot{I}_\phi z_1 l+3k\dot{I}_0 z_1 l$ 其中 $\dot{U}_\phi$ 为保护安装处故障相相电压， $\dot{U}_{f\phi}$ 为故障点故障相电压， $\dot{I}_\phi$ 为故障相电流，$\dot{I}_0$ 为零序电流， l 为保护 安装处到故障点的线路长度。 金属性接地故障时故障点故障相电压为0， 公式可简化为 $\dot{U}_\phi=z_1 l(\dot{I}_\phi+3k\dot{I}_0)$， 此时测量阻抗 $Z_m=\dot{U}_\phi/(\dot{I}_\phi+3k\dot{I}_0)=z_1 l$
相间故障时	$\dot{U}_{\phi\phi}=\dot{U}_{f\phi\phi}+\dot{I}_{\phi\phi}z_1 l$ 其中 $\dot{U}_{\phi\phi}$ 为保护安装处两故障相的相间电压， $\dot{U}_{f\phi\phi}$ 为故障点的相间电压， $\dot{I}_{\phi\phi}$ 为两故障相的电流差。 金属性相间短路时故障点相间电压为0， 公式可简化为 $\dot{U}_{\phi\phi}=\dot{I}_{\phi\phi}z_1 l$，此 时测量阻抗 $Z_m=\dot{U}_{\phi\phi}/\dot{I}_{\phi\phi}=z_1 l$，与故障距离成正比。

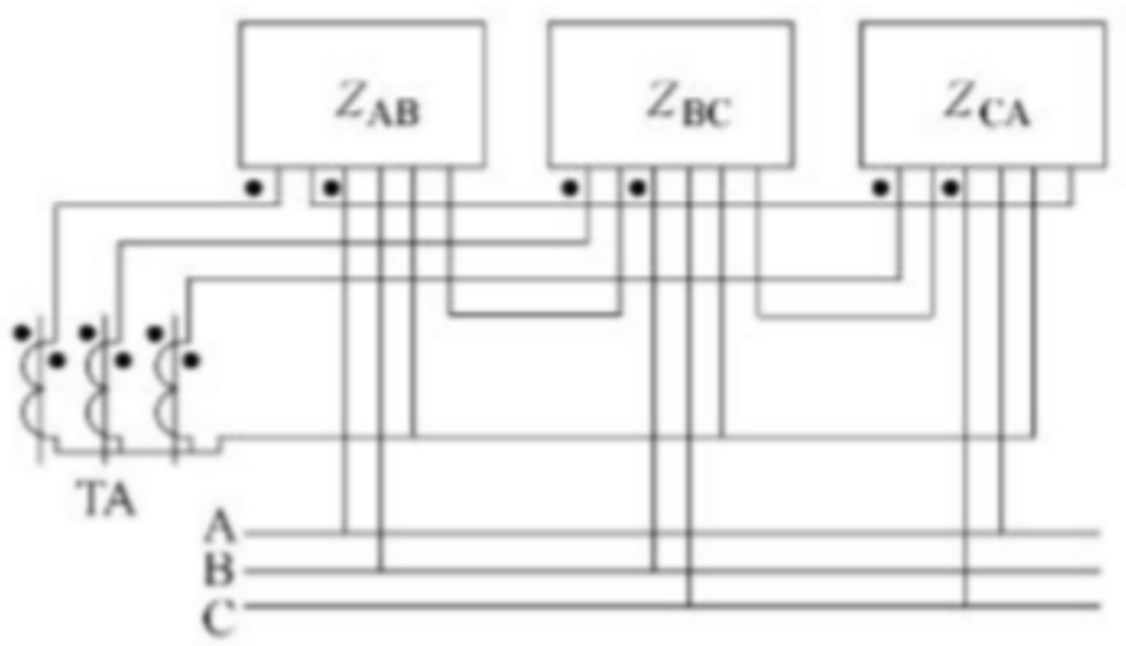
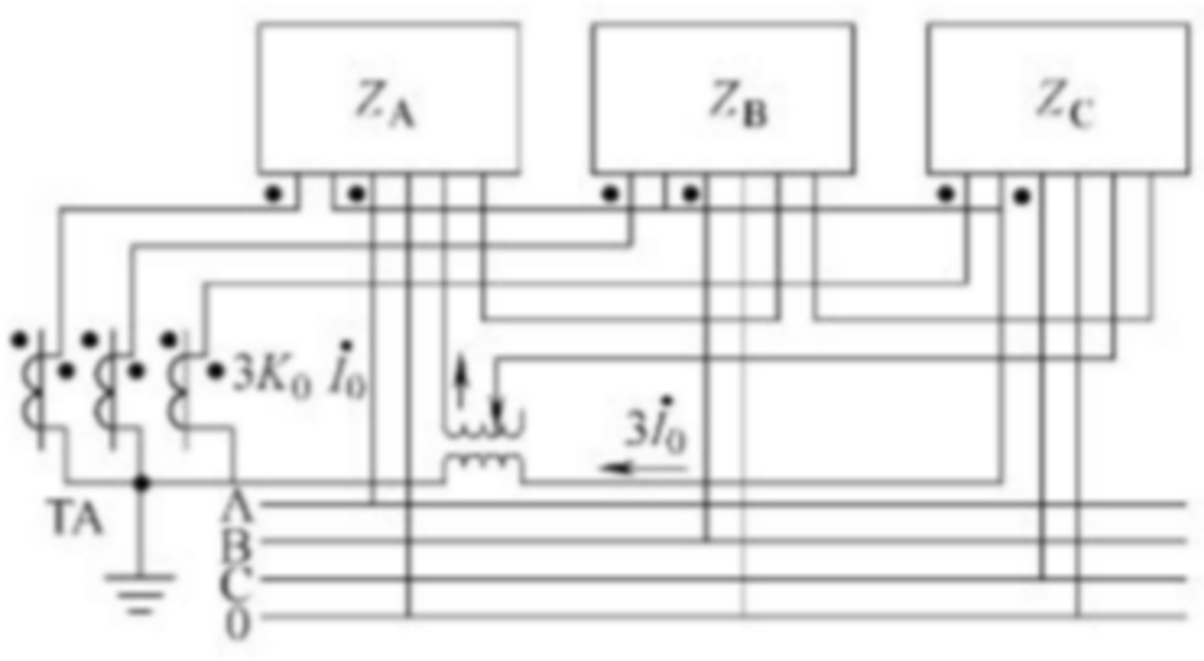
保护整定需考虑助增支路的影响	

【拓展 12】距离保护接线方式

1、常见不同接线时阻抗继电器的输入电压与输入电流：

继电器 / 接线方式	J1		J2		J3	
	$\dot{U}_J$	$\dot{I}_J$	$\dot{U}_J$	$\dot{I}_J$	$\dot{U}_J$	$\dot{I}_J$
0° 接线	$\dot{U}_{AB}$	$\dot{I}_A-\dot{I}_B$	$\dot{U}_{BC}$	$\dot{I}_B-\dot{I}_C$	$\dot{U}_{CA}$	$\dot{I}_C-\dot{I}_A$
具有零序电流补偿的0° 接线	$\dot{U}_A$	$\dot{I}_A+K3\dot{I}_0$	$\dot{U}_B$	$\dot{I}_B+K3\dot{I}_0$	$\dot{U}_C$	$\dot{I}_C+K3\dot{I}_0$

2、接线方式：

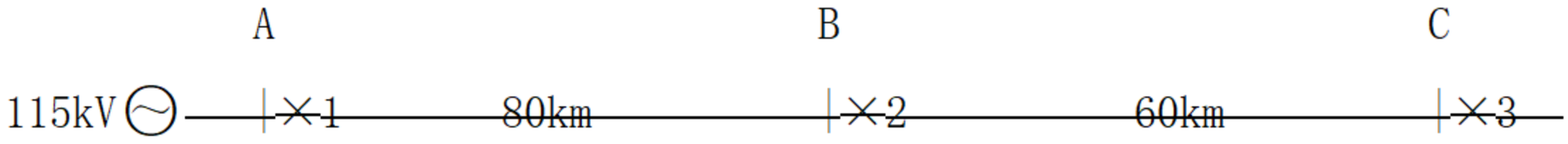
0° 接线： 即 cos φ=1 时加在继电器上的电压和电流同相位。 适用于相间距离保护。	
带零序补偿的相电压-相电流接线： 需考虑零序电流引起的电压降落，采用零序补偿接线。 适用于接地距离保护。	

【拓展 12】阻抗继电器的类型

这是最常用的分类方式，直接影响继电器的方向性和抗过渡电阻能力。

类型		特性
1-圆特性阻抗继电器	①全阻抗圆：	以原点为圆心、整定阻抗为半径的圆，无方向性，任何方向故障只要测量阻抗落入圆内就动作，常用于距离 III 段。
	②方向圆：	特性圆以整定阻抗为直径且过原点，具有明确方向性，只反映正方向故障，但近处故障存在电压死区，需采用记忆回路和引入第三相电压来解决。
	③偏移圆：	特性圆向反方向偏移一部分（偏移度通常 0.1~0.2），可消除方向阻抗继电器的死区，但反方向出口故障时可能失去方向性，一般用于距离 II 段或启动元件。
	④上抛圆、下抛圆：	上抛圆常与方向圆组合成“8”字形用作启动元件；下抛圆可用于发电机失磁保护。
2-多边形（四边形）特性阻抗继电器：		在阻抗平面上呈四边形或多边形，能兼顾耐受过渡电阻的能力和躲负荷能力，目前微机保护中应用最广。
3-直线特性阻抗继电器：		可视为圆特性圆心在无穷远处的特例，包括电抗特性、电阻特性、方向特性等，通常不单独使用，而是与其他特性复合。
4-其他复合特性：		如苹果形、橄榄形、复合四边形等，由多个特性“与”或“或”复合而成。

【案例 04】系统接线如图所示，已知单位电抗 Z=0.4Ω/km，K_{rel}^{I}=0.85，K_{rel}^{II}=0.8，求保护 1 的 I 段、II 段整定值。



解：

保护 1 的 I 段定值=可靠系数*本级末端短路阻抗= $Z_{set.1}^{I}=K_{rel}^{I}$ *Z*L=0.85*0.4*80=27.2Ω，t=0s

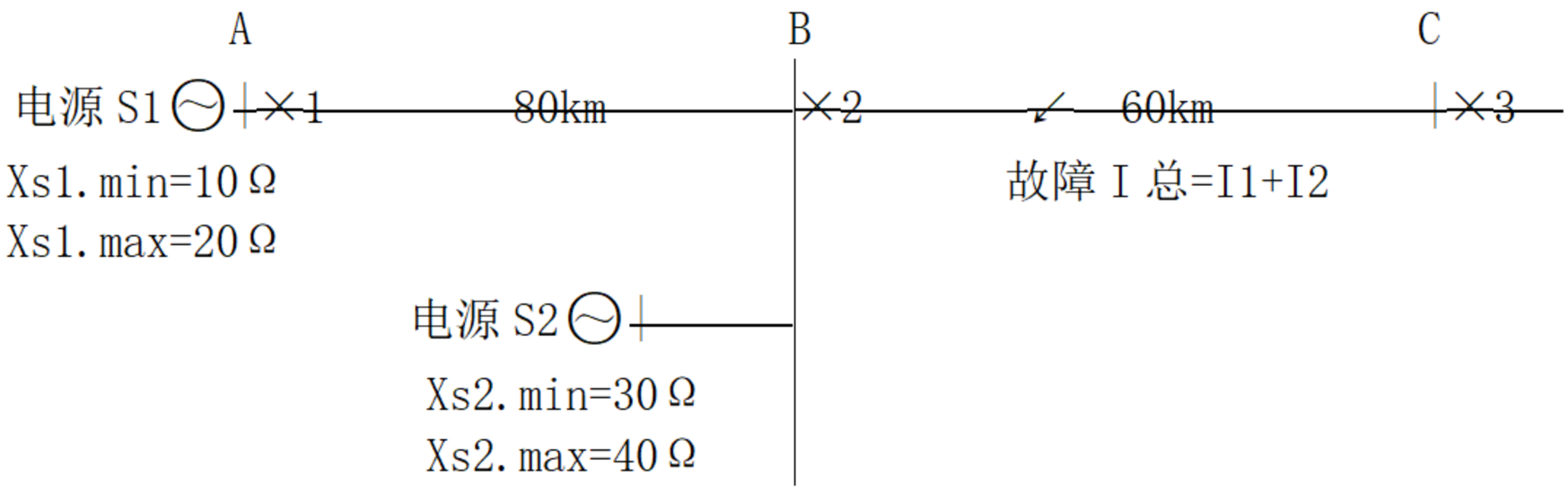
保护 2 的 I 段定值=可靠系数*本级末端短路阻抗= $Z_{set.2}^{I}=K_{rel}^{I}$ *Z*L=0.85*0.4*60=20.4Ω，t=0s

保护 1 的 II 段定值= $Z_{set.2}^{II}=K_{rel}^{II}*(Z_{AB}+Z_{set.2}^{I})$ =0.8*（32+20.4）=41.92Ω， t=0.5s

保护 1 的 I 段是无时限瞬时动作的主保护，保护本级线路 L%=80%

保护 1 的 II 段灵敏性 $K_{sen.1}^{II}=Z_{set.2}^{II}/Z_{AB}$ =41.92/32=1.31＞1.25 满足

【案例05】系统接线如图所示，某母线B存在助增支路，已知单位电抗Z=0.4Ω/km，K_{rel}^{I}=0.85，K_{rel}^{II}=0.8，求保护1的I段、II段整定值。



解：

保护1的I段定值=$Z_{set.1}^{I}=K_{rel}^{I}$*Z*L=0.85*0.4*80=27.2Ω，t=0s

保护2的I段定值=$Z_{set.2}^{I}=K_{rel}^{I}$*Z*L=0.85*0.4*60=20.4Ω，t=0s

最小分支系数：取各种运行方式下分支系数的最小值，保证区外故障时不误动，若为助增电流（分支电源向故障点供电），$K_{b.min}$＞1，会使测量阻抗增大、保护范围缩小；

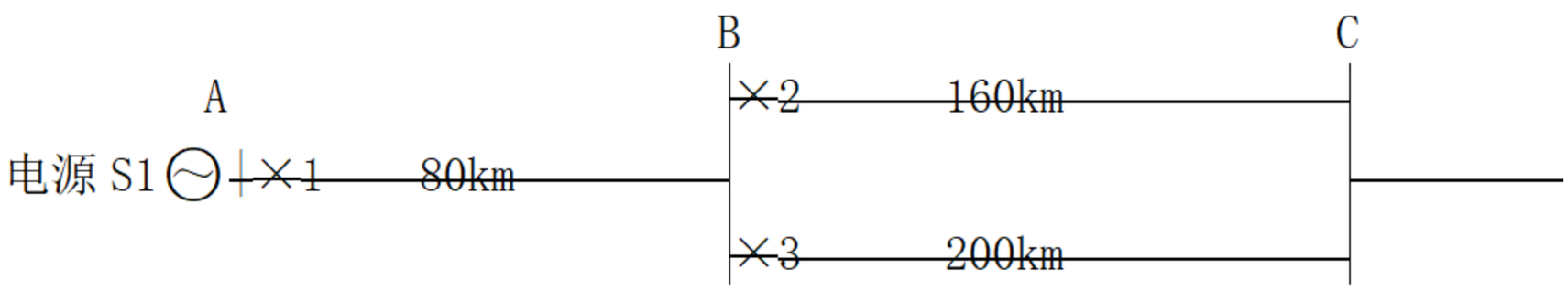
$$K_{b.min}=\frac{\text{下一级保护电流}}{\text{本级保护电流}}=\frac{I\text{总}}{I1}=\frac{I1+I2}{I1}=1+\frac{I2}{I1}=1+\frac{Xs1.\min+Z_{AB}}{Xs2.\max}=1+\frac{10+32}{40}=2.05$$

保护1的II段定值=$Z_{set.2}^{II}=K_{rel}^{II}*(Z_{AB}+K_{b.min}*Z_{set.2}^{I})$=0.8*(32+2.05*20.4)=59.6Ω，t=0.5s

保护1的I段是无时限瞬时动作的主保护，保护本级线路L%=80%

保护1的II段灵敏性$K_{sen.1}^{II}=Z_{set.2}^{II}/Z_{AB}$=59.6/32=1.85＞1.25 满足

【案例06】系统接线如图所示，某母线B存在外汲支路，已知单位电抗Z=0.4Ω/km，K_{rel}^{I}=0.85，K_{rel}^{II}=0.8，求保护1的I段、II段整定值。



解：

保护1的I段定值=$Z_{set.1}^{I}=K_{rel}^{I}$*Z*L=0.85*80*0.4=27.2Ω，t=0s

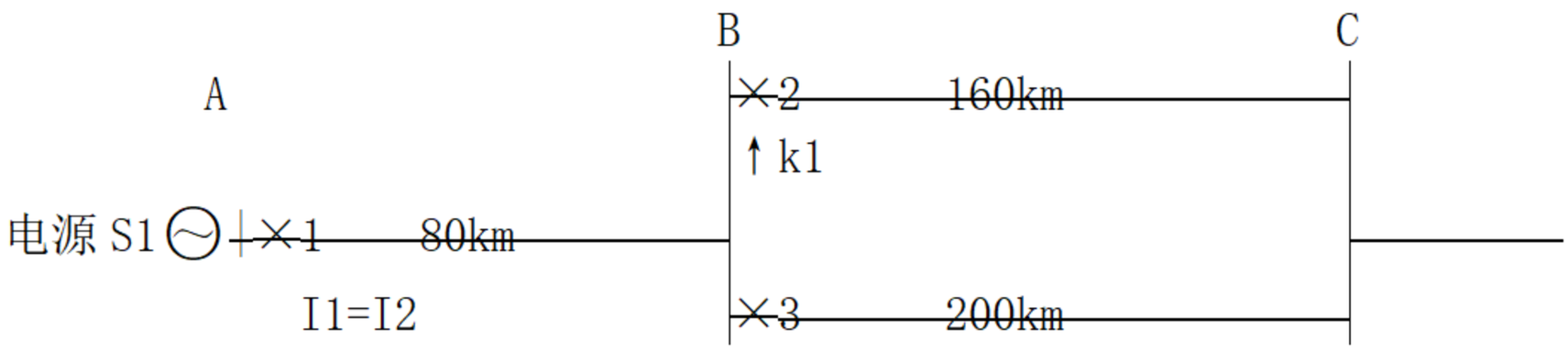
保护2的I段定值=$Z_{set.2}^{I}=K_{rel}^{I}$*Z*L=0.85*160*0.4=54.4Ω，t=0s

保护3的I段定值=$Z_{set.3}^{I}=K_{rel}^{I}$*Z*L=0.85*200*0.4=68Ω，t=0s

最小分支系数：取各种运行方式下分支系数的最小值，保证区外故障时不误动，若为汲出电

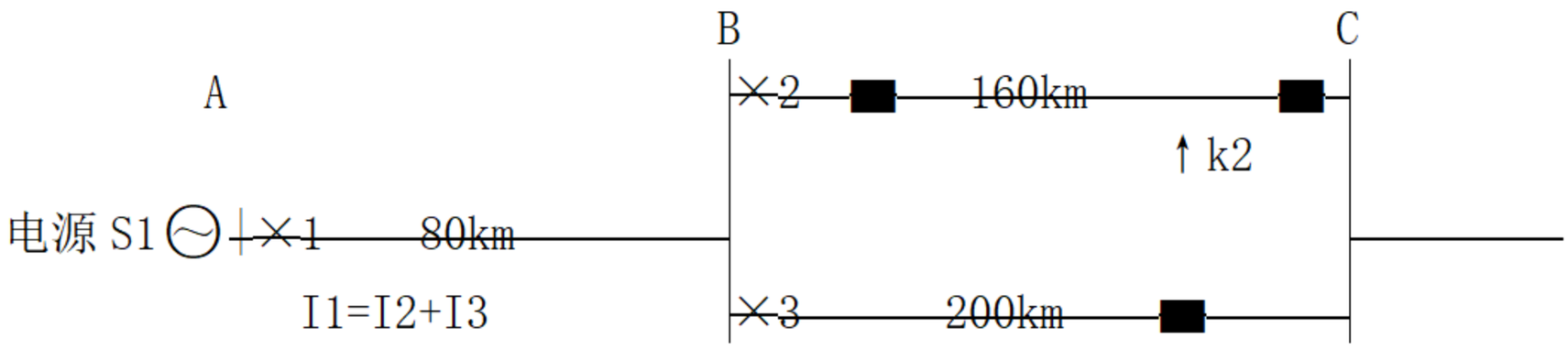
流（故障电流经非故障线路分流），$K_{b.min}$＜1，会使测量阻抗减小、保护范围扩大。

保护 1 的 I 段与下一级保护 2 相配合时：计算故障点在线路首端 k1 时的分支系数最大：



$$K_{b.max}=\frac{\text{下一级保护电流}}{\text{本级保护电流}}=\frac{I2}{I总}=\frac{I2}{I2}=1$$

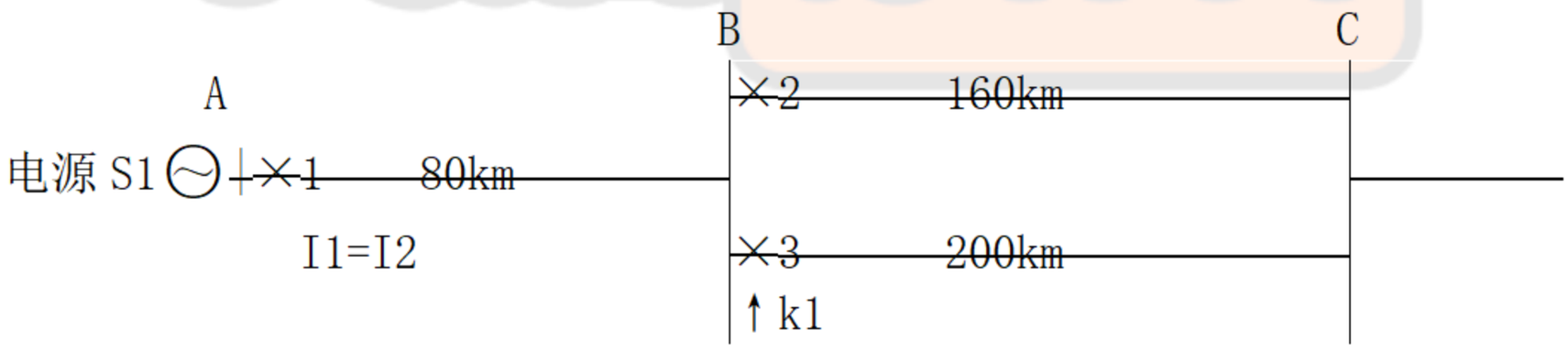
计算故障点在线路 85%的 k2 点时，并联分流，分支系数最小：



$$K_{b.min}=\frac{\text{下一级保护电流}}{\text{本级保护电流}}=\frac{I2}{I总}=\frac{I2}{I2+I3}=\frac{160*0.4*0.15+200*0.4}{160*0.4+200*0.4}=\frac{64*0.15+80}{64+80}=0.62$$

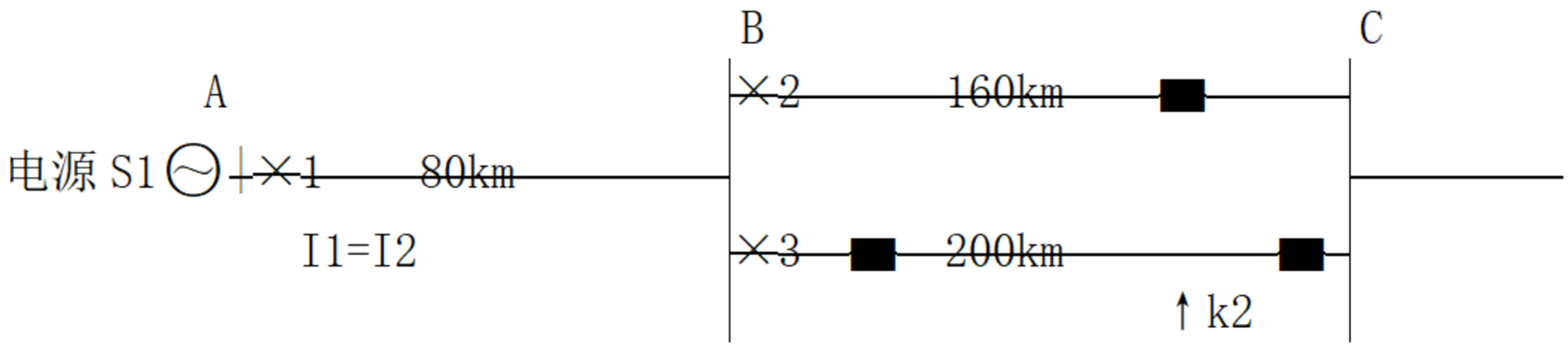
对应 II 段定值=$Z^{II}_{set.2}=K^{II}_{rel}*(Z_{AB}+K_{b.min}*Z^{I}_{set.2})$=0.8*(32+0.62*54.4)=52.58Ω

保护 1 的 I 段与下一级保护 3 相配合时：计算故障点在线路首端 k1 时的分支系数最大：



$$K_{b.max}=\frac{\text{下一级保护电流}}{\text{本级保护电流}}=\frac{I2}{I总}=\frac{I2}{I2}=1$$

计算故障点在线路 85%的 k2 点时，并联分流，分支系数最小：



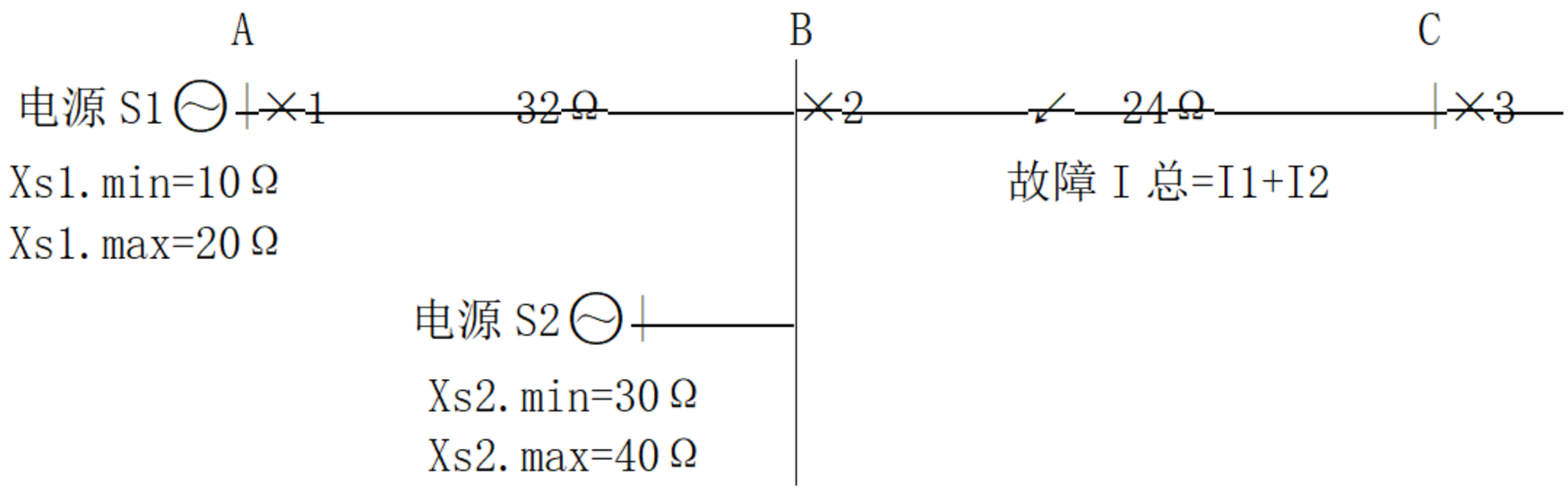
$$K_{b.min}=\frac{\text{下一级保护电流}}{\text{本级保护电流}}=\frac{I2}{I总}=\frac{I2}{I2+I3}=\frac{160*0.4+200*0.4*0.15}{160*0.4+200*0.4}=\frac{64+80*0.15}{64+80}=0.53$$

对应 II 段定值=$Z^{II}_{set.2}=K^{II}_{rel}*(Z_{AB}+K_{b.min}*Z^{I}_{set.2})$=0.8*(32+0.53*68)=54.43Ω

保护 1 的 II 段定值=min｛52.58Ω，54.43Ω｝=52.58Ω，t=0.5

保护 1 的 II 段灵敏性 $K^{II}_{sen.1}=Z^{II}_{set.2}/Z_{AB}$=52.58/32=1.64＞1.25 满足

【案例 07】已知 110kV 线路 AB 最大负荷电流为 228.6A，求采用全阻抗继电器和方向阻抗继电器保护III段的整定值，并验证灵敏性。（K_{rel}^{III}=0.8，K_{ss}=2，K_{re}=1.2，Φk=75°，Φ_L=30°）



解：（1）采用全阻抗继电器：

计算最小负荷阻抗（考虑最低运行电压为 0.9 倍额定电压）：

$Z_{L.min}$=0.9Un/（$\sqrt{3}*I_{L.max}$）=0.9*110*1000/（1.732*228.6）=250Ω

保护 1 的III段定值=$Z_{set.1}^{III}=\frac{K_{rel}^{III}}{K_{ss}*K_{re}}*Z_{L.min}$=0.8/（2*1.2）*250=83.33Ω

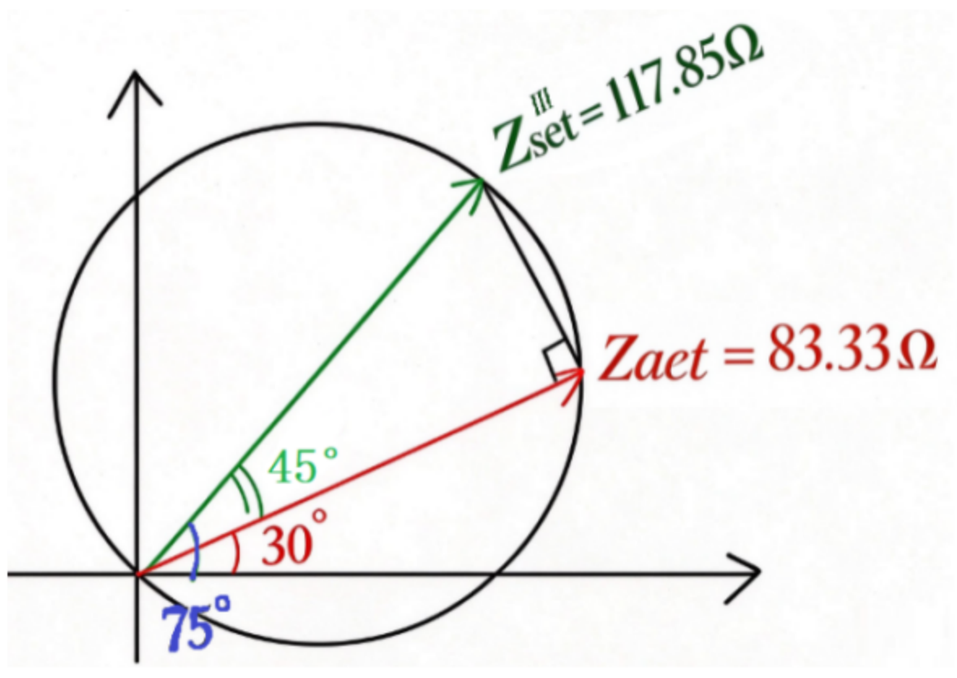
（近后备）保护 1 的III段灵敏性$K_{sen.1}^{III}$=83.33/32=2.6＞1.5 满足

最大分支系数：助增电流（分支电源向故障点供电），灵敏性考虑最不利情况时。

$$K_{b.max}=\frac{\text{下一级保护电流}}{\text{本级保护电流}}=\frac{I总}{I1}=\frac{I1+I2}{I1}=1+\frac{I2}{I1}=1+\frac{Xs1.max+Z_{AB}}{Xs2.min}=1+\frac{20+32}{30}=2.73$$

（远后备）保护 1 的III段灵敏性$K_{sen.1}^{III}$=83.33/（32+2.73*24）=83.33/97.52=0.85＜1 不动作

（2）采用方向阻抗继电器（可提高灵敏性）：



$K_{b.max}$=2.73，计算同上。

保护 1 的III段定值=$Z_{set.1}^{III}=\frac{K_{rel}^{III}}{K_{ss}*K_{re}}*Z_{L.min}*\frac{1}{\cos(\Phi_k-\Phi_L)}$=83.33*$\frac{1}{\cos(75°-30°)}$=117.85Ω

（近后备）保护 1 的III段灵敏性$K_{sen.1}^{III}$=117.85/32=3.68＞1.5 满足。

（远后备）保护 1 的III段灵敏性$K_{sen.1}^{III}$=117.85/（32+2.73*24）=117.85/97.52=1.21＜1 满足。

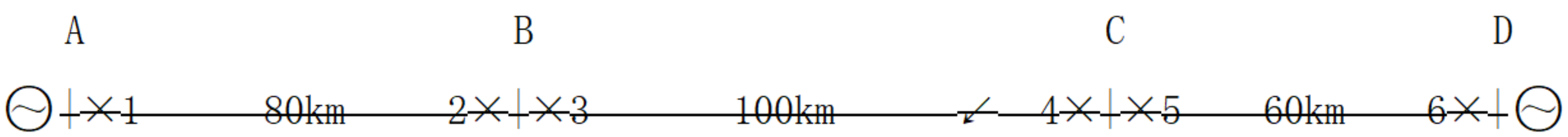
【拓展 13】影响距离保护的因素

因素类型	主要影响	应对措施
1-短路点过渡电阻	故障点电弧、杆塔接地等附加电阻会让测量阻抗变大，保护范围缩短，可能导致拒动或延时动作。	采用四边形特性或电抗型继电器，扩大动作区在电阻轴方向的范围；也可用瞬时测量装置在故障初期锁定测量结果。
2-电力系统振荡	振荡时电压电流周期性变化，测量阻抗可能落入动作区，造成误动。	装设振荡闭锁装置，利用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ段启动时序差异区分振荡和故障，振荡时闭锁保护。
3-电压回路断线	二次电压消失会让阻抗继电器误以为测量阻抗为零，从而误动作。	装设电压回路断线闭锁装置，失压时立即闭锁保护。
4-短路暂态分量	非周期分量和谐波会让测量波形畸变，影响阻抗计算精度。	采用傅里叶等高性能滤波算法，滤除非周期分量和谐波；也可在故障初期短时缩小保护范围躲过暂态过程。
5-互感器误差	CT/PT 的传变误差直接影响阻抗计算，特别是暂态 过程误差更大。	选用高精度互感器并定期校验维护；整定计算时考虑互感器误差影响。
6-分支电流	多电源线路中，分支电流会改变故障点测量阻抗，影响保护范围。	整定距离Ⅱ段时用最小分支系数保证保护范围，校验Ⅲ段时用最大分支系数保证灵敏度。
7-线路电容电流	长线路分布电容会产生附加电流，导致测量偏差。	长线路装设并联电抗器补偿，或采用微分方程算法修正。
8-方向继电器死区	在出口三相短路时测量阻抗趋近于零，电压量不足以支撑相位比较逻辑，保护会直接拒动。	引入极化电压（记忆回路或第三相电压）消除出口短路死区；也可采用偏移特性阻抗继电器。

【拓展 14】工频变化量保护的特点

1-动作速度快	利用故障突变量瞬时启动，无需延时，出口故障时能高速动作。
2-躲过渡电阻能力强	变化量受过渡电阻影响小，保护范围稳定，也能有效防止经过渡电阻短路时对侧电源助增引起的超越。
3-无死区、无超越	区内故障可靠动作，区外故障不误动，正向、反向区域明确。
4-不反映系统振荡	振荡时无故障突变，保护不会误动；也不受正常负荷电流影响。
5-瞬时动作的主保护	不适合构成延时的后备保护；它虽然能保护各类故障（含对称故障），但不能像零序、负序分量那样在不对称故障持续期间长期存在。

【案例 08】采用闭锁式距离纵联，距离 II 段 K_{senl}^{II}=1.5，距离III段保护范围包括本线全长及下一线全长，BC 线距 C 母线 10km 发主短路，则说法正确的是(BCD)[多选]



A、1 不发闭锁信号，保护不动作　　B、2 发闭锁信号，保护不动作

C、3 不发闭锁信号，保护动作　　D、5 发闭锁信号，保护不动作

解析：

保护 1：故障在 II 段范围外，且在III段范围内，保护不启动，发闭锁信号。

保护 2：故障在 II 段范围外，且在III段范围内，保护不启动，发闭锁信号。

保护 3：故障在 II 段范围内，且在III段范围内，保护启动，停发闭锁信号。

保护 4：故障在 II 段范围内，且在III段范围内，保护启动，停发闭锁信号。

保护 5：故障在 II 段范围外，且在III段范围内，保护不启动，闭锁信号。

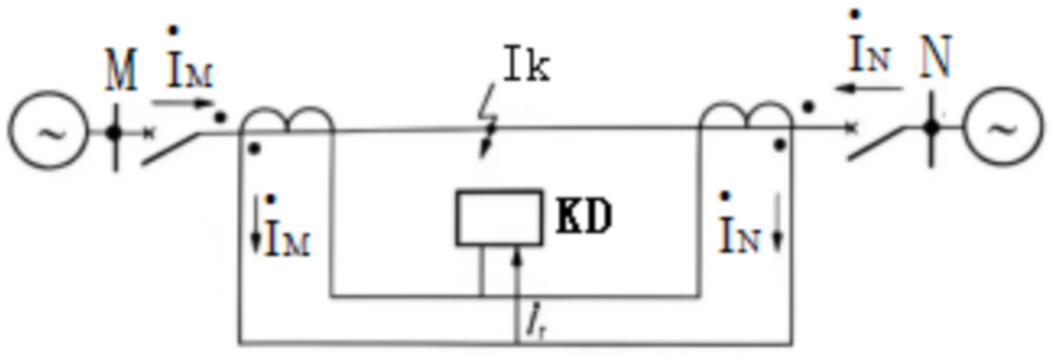
保护 6：故障在 II 段范围内，且在III段范围内，保护启动，停发闭锁信号。

【案例 09】一般国产高频保护装置大多采用(A)

A、故障时发闭锁信号的工作方式　　B、长期发允许信号的工作方式

C、故障时发跳闸信号的工作方式　　D、长期发闭锁信号的工作方式

【拓展 14】纵联电流差动保护原理



1、特点：

①继保电流正方向规定：母线流向线路为正。

②正常、区外故障：$|\dot{I}_M+\dot{I}_N|=0$

③区内故障：$|\dot{I}_M+\dot{I}_N|=Ik$

2、不带制动特性的差动继电器：

$$Id=|\dot{I}m+\dot{I}n|\geqslant Iset$$

①躲过外部短路时最大不平衡电流；

②躲过最大负荷电流。

3、带制动线圈的差动继电器，可提高内部短路的灵敏性和外部短路不误动的可靠性：

$$|\dot{I}_M+\dot{I}_N|-K*|\dot{I}_M-\dot{I}_N|\geqslant Iop$$

其中：K 为制动系数，

Iop 为克服继电器动作机械摩擦

制动线圈电流 $Ir=|\dot{I}_M-\dot{I}_N|$

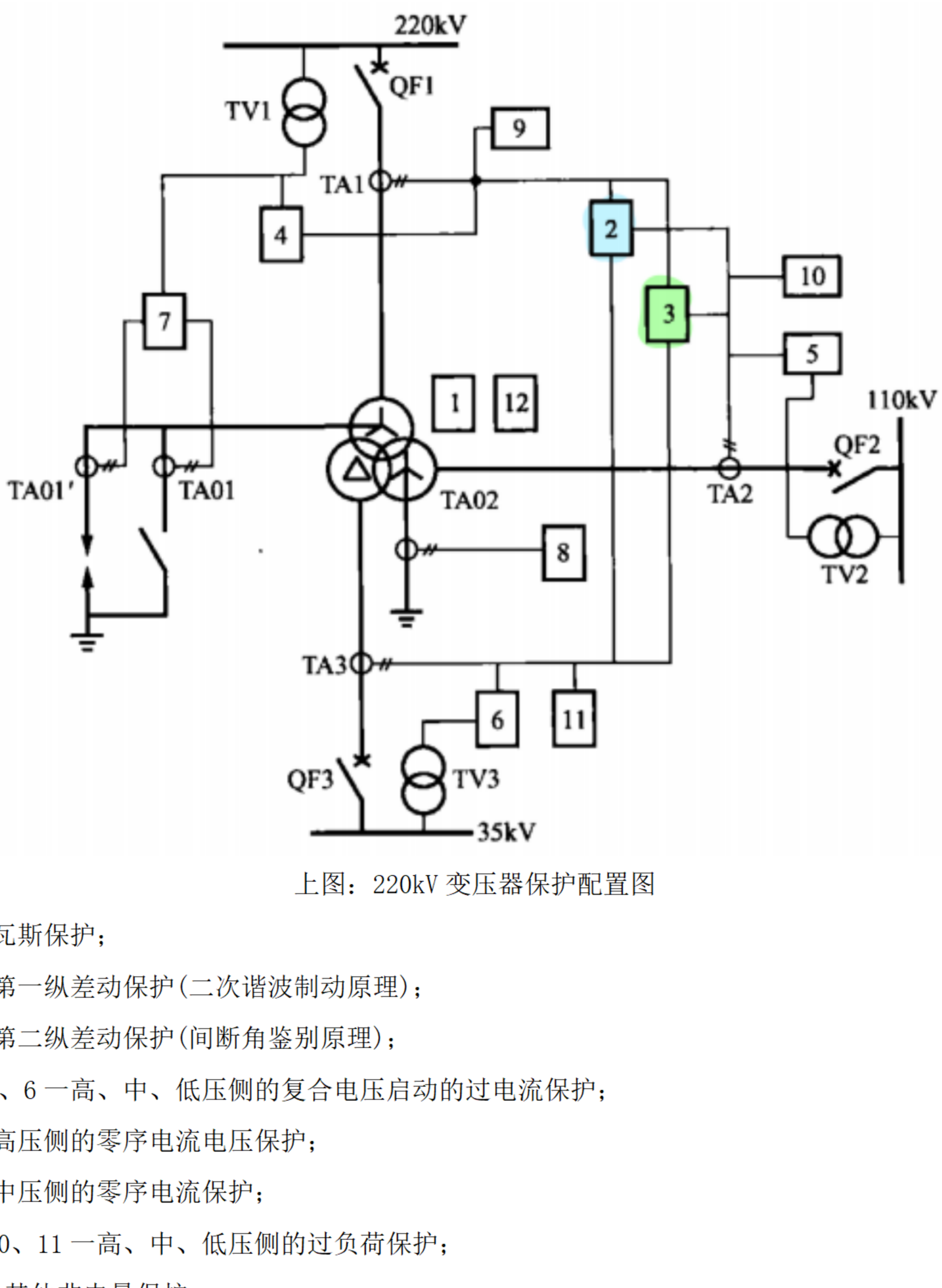
动作线圈电流 $Id=|\dot{I}_M+\dot{I}_N|$

【拓展 15】重合闸前加速和后加速

前加速：不加延时跳闸再重合，如永久性故障则按定值有选择性跳闸，适合 35kV 及以下。

后加速：按定值有选择性跳闸再重合，如永久性故障则 0 秒跳闸(加速)，适用 110kV 及以上。

【拓展 16】220kV 变压器保护配置图



上图：220kV 变压器保护配置图

1 一瓦斯保护；

2 一第一纵差动保护(二次谐波制动原理)；

3 一第二纵差动保护(间断角鉴别原理)；

4、5、6 一高、中、低压侧的复合电压启动的过电流保护；

7 一高压侧的零序电流电压保护；

8 一中压侧的零序电流保护；

9、10、11 一高、中、低压侧的过负荷保护；

12 一其他非电量保护。

【拓展 17】变压器保护配置要求（参考 GB/T 14285-2023）

保护类别	具体保护项目	配置要求与适用场景	依据条款	对应页码
主保护	电流速断保护	10kV 及以下、10MVA 及以下变压器配置，重要变压器优先用差动保护替代	5.3.3.1	17/22
	纵联差动保护	10kV 以上、10MVA 以上变压器必须配置；500kV 及以上可增配分侧差动保护	5.3.3.2	17/22
	瓦斯保护	0.4MVA 及以上户内油变、0.8MVA 及以上油变配置，轻瓦斯发信号、重瓦斯直接跳闸	5.3.7.2	22
后备保护	复合电压闭锁过流保护	作为相间短路后备，灵敏度不足时替代普通过流保护	5.3.5.1	18/23
	零序电流保护	中性点直接接地系统配置，两段式动作，短时限跳母联、长时限跳各侧	5.3.5.2	19/23
	过负荷保护	并列/备用变压器配置，带时限动作于信号，不直接跳闸	5.3.5.4	20/24
	过励磁保护	大容量主变配置，应对电压异常升高引发的铁芯过热故障	5.3.6.1	21/24
非电量保护	温度保护、油位保护、压力释放保护	油浸式变压器标配；干式变压器取消瓦斯保护，强化绕组超温保护	5.3.7	22
特殊要求	双重化配置	220kV 及以上变压器电气量保护双套独立配置，TA/TV/直流电源/跳闸回路完全独立	4.2.2	9/10
	失灵联跳功能	任一侧断路器带失灵保护时，需联跳变压器各侧断路器	5.3.8	22/25

【拓展 18】单母线差动保护分类及特点

单母线没有双母线那种“小差选母线”逻辑，只要母差启动，**整段母线所有开关跳闸。**

分类	基本原理	优点	缺点	适用场景
完全电流差动（无制动型）	1.将母线上全部元件 CT 二次接入差动回路； 2.正常/区外故障：差流≈0； 3.母线故障：Id=Ik，Id>Iset 动作	1.原理最简单、接线简单，调试方便 2.动作快； 3.易于理解	1.区外故障 CT 饱和产生不平衡电流，容易误动； 2. 定值要躲开最大不平衡电流，灵敏度偏低； 3.要求 CT 变比、特性尽量一致	老型电磁式保护、35kV 及以下小型单母线、故障电流不大、CT 不易严重饱和的变电站
比率制动式电流差动（微机主流）	动作判据：差动电流>动作门槛，且 Id>K*Ires，制动电	1.区外故障有制动，抗 CT 饱和能力强，不易误动；	1. 算法相对复杂； 2. 需要合理整定	目前最常用，110kV 及以下单母线、分段单母

	流取各支路和电流；区外故障电流越大，制动越强，抑制 CT 饱和带来的不平衡电流。	2. 区内故障制动小，灵敏度高； 3. 微机实现，可带 CT 断线闭锁、复合电压闭锁	制动系数 K	线，绝大多数微机母差
复式比率制动差动	在普通比率制动基础上，引入故障分量/区分穿越电流，制动区外故障的同时，提高内部故障灵敏度，区分区内故障与 CT 饱和。	1. 抗 CT 饱和能力优于普通比率制动； 2. 区内故障灵敏度更高； 3. 能区分 CT 饱和与真实母线故障	逻辑更复杂，对装置采样性能要求高	大短路电流、区外故障 CT 极易深度饱和的高压单母线
高阻抗母线差动保护（高阻母差）	差动回路串联大阻抗；区外故障 CT 饱和时，差动回路电压低；母线故障时差回路产生高电压，电压元件动作跳闸（电压判据）	1. 极强抗 CT 饱和，区外故障几乎不误动； 2. 整定简单，无需复杂制动系数； 3. CT 二次断线不易误动	1. 要求 CT 特性一致、容量足够； 2. 母线故障时二次侧产生很高过电压，必须配非线性限压电阻； 3. 成本偏高	高压、大短路电流的单母线，GIS、重要厂站，国外应用较多
低阻抗母线差动保护（低阻母差）	差动回路阻抗很小，微机采集各支路电流，用比率制动算法计算差流，属于电流型母差	1. CT 变比可以不一致，适应性强； 2. 接线灵活，微机扩展方便； 3. 故障动作速度快	抗 CT 饱和依靠软件算法，严重饱和工况下可靠性弱于高阻型	国内微机母差绝大多数属于低阻抗方案，广泛用于 35~110kV 单母线

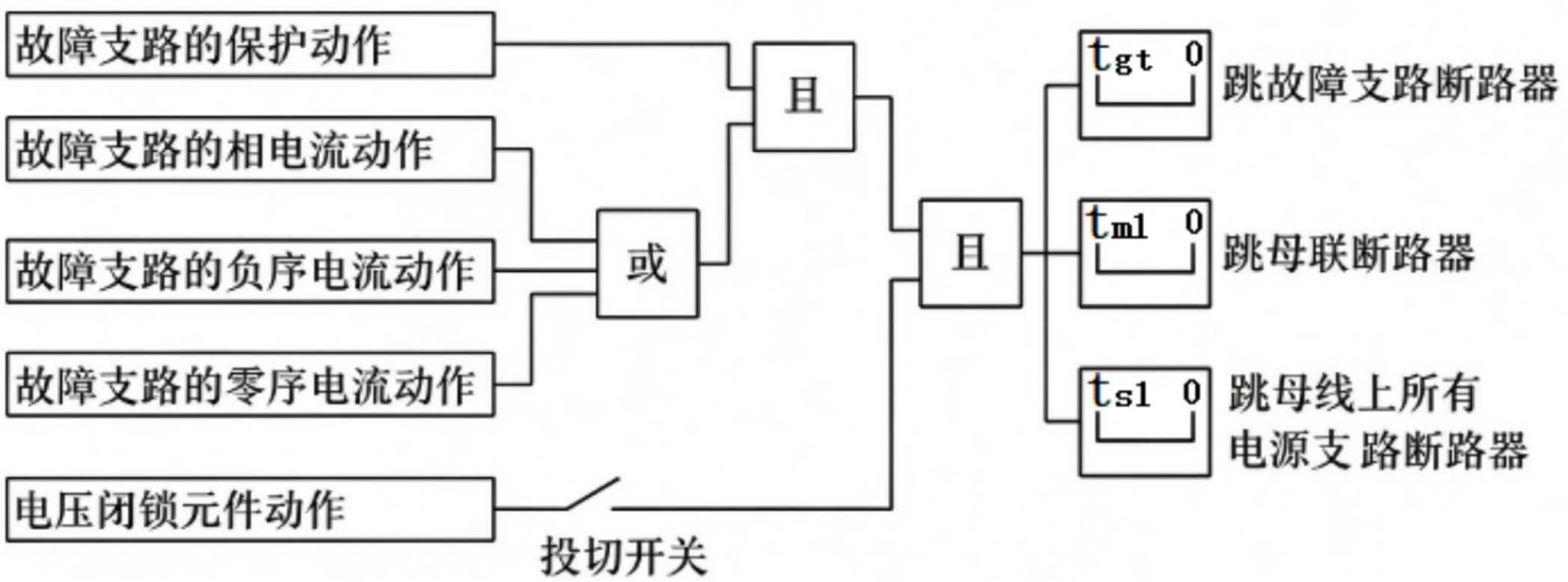
【拓展 19】双母线差动保护分类及特点

类型	核心特点
固定连接式完全电流差动	依靠支路固定在Ⅰ、Ⅱ母，大差+固定小差；倒母线（破坏固定连接）时故障会跳两段母线，老式电磁保护，现已少用。
母联电流相位比较式(比相式)	比较母联电流与总差流相位，选出故障母线；可适应倒母线操作；单电源工况易拒动，老式保护。
比率制动式微机双母差（国内主流）	大差判母线故障，小差选故障母线；依靠隔刀辅助接点动态切换小差电流；区外故障有制动，抗 CT 饱和；逻辑含母联死区、失灵保护，适用于 110kV 及以上枢纽变电站。
复式比率制动双母差	改进比率制动，可区分 CT 饱和与母线故障；区内故障灵敏度更高；抗饱和性能优于普通比率制动，适合短路电流大的 220kV 及以上站。
中阻抗型双母差	差动回路接入中等阻抗；兼顾低阻、高阻优点，抗 CT 饱和较强，二次无危险过电压；曾大量用于 220kV 老式保护。
高阻抗双母差	差动回路串联大阻抗，电压型动作；抗 CT 饱和极强；故障时二次产生高过电压，需限压电阻，GIS 站较多采用。

【拓展 20】母线差动保护综合对比表（单母线/单母分段/双母线）

对比项目	单母线差动	单母线分段差动	双母线差动
一次接线	所有元件接在同一段母线上	一条母线经分段断路器分为 Ⅰ、Ⅱ 两段，支路固定接入某一段	Ⅰ、Ⅱ 两条母线，各元件经两把隔刀，可倒母线切换
保护逻辑	仅一套差动，无大差小差区分	大差判别是否母线故障；小差选出故障母段	大差判别是否母线故障；小差选出故障母线
刀闸接点	不需要隔离开关辅助接点	不需要隔离开关辅助接点	必须接入隔离开关辅助接点，用于动态切换小差电流
故障跳闸	母线故障跳母线上全部断路器	故障段所有元件+分段开关跳闸，完好母段保留供电	故障母线上所有元件+母联开关跳闸，完好母线继续运行
倒母线操作	无倒闸操作	无倒母线操作，支路固定	存在倒母线操作；倒母过程保护逻辑需特殊处理（双跨）
保护复杂度	最简单	中等	最复杂，需配置母联死区、母联充电保护
优点	原理简单，调试方便	故障只切除一段，保留另一段供电，可靠性优于单母线	供电可靠性最高，可不停电倒母线检修
缺点	母线故障全站失压	支路不能跨段切换	逻辑复杂；刀闸辅助接点异常易引发保护误动
适用场景	35kV 小型变电站	35kV、110kV 中小型变电站	110kV 及以上枢纽、重要变电站

【拓展 21】断路器失灵保护的逻辑功能框图



断路器失灵保护原理：当故障设备的保护动作发出跳闸命令但断路器拒动时，通过检测故障电流是否持续存在来判别断路器失灵，并跳开相邻断路器以缩小停电范围的近后备保护。

保护类型	属于母线近后备保护： 1 断路器失灵相当于母线故障； 2 断路器失灵和母线保护启动同一出口→跳母线所有 QF。
配置电压等级	一般在 220kV 及以上断路器上配置，部分重要的 110kV 断路器也会配置 。
配置条件	相邻元件保护的远后备保护灵敏度不够时，或变电所重要性较高、失灵保护能缩小停电范围时应装设。
启动条件	需同时满足两个条件：保护跳闸接点动作+故障电流持续存在（过流判别）。
判别元件	采用相电流（线路）、零序电流（变压器）的“有流”判别方式，确认故障确未消除 。
动作时间	国标要求 0.2～0.5s 延时，躲开断路器正常分闸时间 ；220kV 系统失灵出口短延时约 0.35s 跳母联，长延时 0.5s 跳母线上所有开关 。
电压闭锁	由母线低电压、负序电压和零序电压继电器构成，与母差保护共用时共用电压闭锁元件 。