

# 工频变化量母线保护继电器的研究

湖北电力中心调度所 蔡 敏

**摘要** 电力系统母线保护对电网的稳定运行有其重要的作用,当母线故障时,快速、可靠地切除故障母线是电力系统稳定控制措施的重要方面。目前,微计算机在电力系统已有广泛应用,因此,研究原理上先进、方便实用、便于计算机实现的母线保护是必要的。

本文研究的母线保护继电器,主要以实用为目的,从原理上着眼于有广泛的适用性,应用和整定计算简单方便,易于现场掌握应用。

**关键词** 母线保护 工频变化量

## 1 概述

母线保护在电力系统中已有广泛的应用,基本原型都基本上基于差流,下面对几种母线保护的特点作简单地概述:

### 1.1 带速饱和变流器的低阻抗型差动保护

(1) 当CT由于故障电流交流分量过大的原因出现饱和时,保护仍可能误动,即与CT特性有关,正确动作有赖于正确传变。

(2) 故障电流中存在直流分量,保护也将延时动作,因此,需对CT以及中间变流器特性有较严格的要求。

### 1.2 母联电流比相式差动保护

(1) 母线经过渡电阻接地,且 $R \geq$ 母线综合短路阻抗 $Z_s$ 的0.6倍(故障母线侧系统为送端和大电源侧,而非故障母线侧系统为受端和小电源侧,故障前送端电势超前受端电势 $60^\circ$ )。此时,比相元件有可能误判断造成故障母线拒绝跳闸和非故障母线误跳闸。

(2) 当母联断开,故障电流较大,而比相元件内部两个(电和磁的)回路又不可能十分对称,则可能出现误判断,使保护拒动或误跳健全母线。

### 1.3 电流比相式保护

(1) 当区外故障时,故障电流中存在较大的直流分量,而使电流互感器严重饱和,其2次无输出或波形畸变时,若无特殊措施保护仍可能误动作。

(2) 对经过较高过渡电阻的母线故障,由于负荷电流的影响,保护有拒动的可能(情况与母线联络开关电流比相式差动保护相仿)。

### 1.4 高阻抗型电流差动保护

(1) 需对差动回路总阻抗值进行选择,以保证选择性与灵敏度要求。

(2) 大故障电流下,CT二次侧可能出现过高电压。

(3) CT饱和对其仍有影响。

### 1.5 “RA DSS”型母线保护装置

(1) 可以反应相间及接地故障(且带比率制动)

(2) 快速动作,大约经 $8 \sim 13\text{ms}$ 接通开关跳闸线圈。

(3) 若发生短路容量无穷大(MVA)及线路CT完全饱和的穿越性故障时,仍能保证足够的稳定。

(4) 差动继电器的整定值低于最大线路负荷电流的20~60%。

(5) 保护灵敏度基本上不受接入差动回路引出线回路数的影响。

(6) 线路CT只要合乎设计标准,可有较差特性和不同变化。

(7) 可使用具有较大回路电阻的标准CT引线。

(8) 其它继电器可以与其共用同一CT回路

“RADSS”型母线保护较其它保护有其明显的优势性,但其整定与调试也较复杂。因此,研究一种便于微计算机实现的母线保护有其必要性。

## 2 工频变化量母线保护继电器基本原理

本文提出了工频变化量母线保护继电器,其原理简单、明了,便于微计算机实现。

以图1的系统为例,母线M发生故障(设电流指向母线为正方向,可知,母线联接元件上的故障电流都为正方向,因此,我们只需检测出每个母线联接元件上的电流方向,即可判断出母线是否发生故障。当检测出所有母线联接元件上的电流方向都为正方向时,则可判别出母线发生了故障,当检测出某一母线联接元件上电流方向为负方向时,则可判别出发生的故障是非母线故障。

当母线M发生故障时,相当于在母线F<sub>1</sub>点投入了一新电源,变化量即由此新电源产生,对于母线联接元件1可得

( $Z_{1s1}, Z_{1s2}, \dots, Z_{1s_n}$ 为工频阻抗):

$$U_{As1} = -(\dot{I}_{1s1}Z_{1s1} + \dot{I}_{2s1}Z_{2s1} + \dot{I}_{0s1}Z_{0s1})$$

$$U_{Bs1} = -(\dot{a}^2 \dot{I}_{1s1}Z_{1s1} + \dot{a} \dot{I}_{2s1}Z_{2s1} + \dot{I}_{0s1}Z_{0s1})$$

$$U_{Cs1} = -(\dot{a} \dot{I}_{1s1}Z_{1s1} + \dot{a}^2 \dot{I}_{2s1}Z_{2s1} + \dot{I}_{0s1}Z_{0s1}) \quad (2.1)$$

$$U_{0s1} = -\dot{I}_{0s1}Z_{0s1}$$

式中的 $U_{As1}, U_{Bs1}, U_{Cs1}$ 为母线上的三相电压, $U_{0s1}$ 为零序电压,

$\dot{I}_{1s1}, \dot{I}_{2s1}, \dot{I}_{0s1}$ 为母线联接元件1上的正序、负序、零序电流, $Z_{1s1}, Z_{2s1}, Z_{0s1}$ 分别为等值的正序、负序、零序阻抗,式中的电压、电流都为变化分量。

变化分量的电流可普遍表示为:

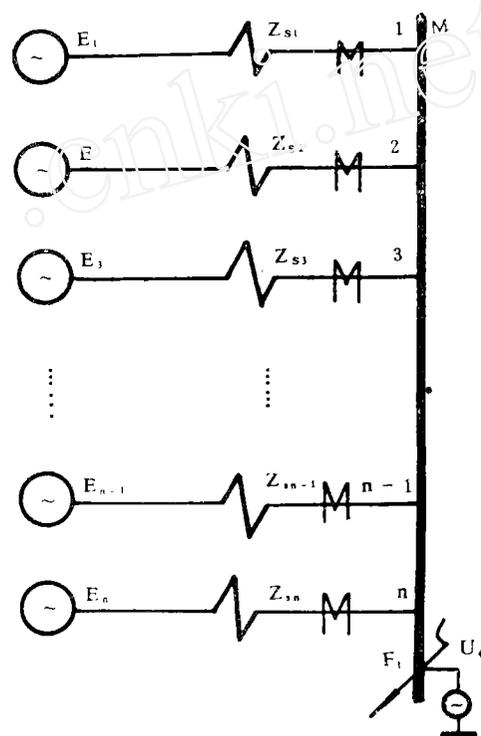


图1 系统等值图

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{AS1} &= \dot{I}_{1S1} + \dot{I}_{2S1} + \dot{I}_{0S1} \\ \dot{I}_{BS1} &= a^2 \dot{I}_{1S1} + a \dot{I}_{2S1} + \dot{I}_{0S1} \\ \dot{I}_{CS1} &= a \dot{I}_{1S1} + a^2 \dot{I}_{2S1} + \dot{I}_{0S1} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

设:

$$\left. \begin{aligned} U'_{AS1} &= U_{AS1} - U_{0S1} \\ U'_{BS1} &= U_{BS1} - U_{0S1} \\ U'_{CS1} &= U_{CS1} - U_{0S1} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

$$\left. \begin{aligned} I'_{AS1} &= \dot{I}_{AS1} - \dot{I}_{0S1} \\ I'_{BS1} &= \dot{I}_{BS1} - \dot{I}_{0S1} \\ I'_{CS1} &= \dot{I}_{CS1} - \dot{I}_{0S1} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

将式(2.1)代入(2.3):

$$\left. \begin{aligned} U'_{AS1} &= -(\dot{I}_{1S1} Z_{1S1} + \dot{I}_{2S1} Z_{2S1}) \\ U'_{BS1} &= -(a^2 \dot{I}_{1S1} Z_{1S1} + a \dot{I}_{2S1} Z_{2S1}) \\ U'_{CS1} &= -(a \dot{I}_{1S1} Z_{1S1} + a^2 \dot{I}_{2S1} Z_{2S1}) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

电力系统中,一般地在暂态过程中正负序阻抗很相近,故假定:

$$Z_{1S1} = Z_{2S1} \quad (2.6)$$

将(2.6)代入(2.5)可得:

$$\left. \begin{aligned} U'_{AS1} &= -(\dot{I}_{1S1} + \dot{I}_{2S1}) Z_{1S1} = -I'_{AS1} Z_{1S1} \\ U'_{BS1} &= -(a^2 \dot{I}_{1S1} + a \dot{I}_{2S1}) Z_{1S1} = -I'_{BS1} Z_{1S1} \\ U'_{CS1} &= -(a \dot{I}_{1S1} + a^2 \dot{I}_{2S1}) Z_{1S1} = -I'_{CS1} Z_{1S1} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

同理,母线故障时对于母线联接元件2、母线联接元件3……,母线联接元件n可得出以下等式:

$$\left. \begin{aligned} U'_{AS2} / -I'_{AS2} &= Z_{1S2} \\ U'_{BS2} / -I'_{BS2} &= Z_{1S2} \\ U'_{CS2} / -I'_{CS2} &= Z_{1S2} \\ \vdots & \\ U'_{ASn} / -I'_{ASn} &= Z_{1Sn} \\ U'_{BSn} / -I'_{BSn} &= Z_{1Sn} \\ U'_{CSn} / -I'_{CSn} &= Z_{1Sn} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

当发生非母线故障,故障点在母线联接元件I上时,对于母线联接元件1,母线联接元件2、……,母线联接元件(I-1)、母线联接元件(I+1)、……,母线联接元件n有:

$$\left. \begin{aligned} U'_{\phi S1} / -I'_{\phi S1} &= Z_{1S1} \\ U'_{\phi S2} / -I'_{\phi S2} &= Z_{1S2} \\ \vdots & \\ U'_{\phi S(I-1)} / -I'_{\phi S(I-1)} &= Z_{1S(I-1)} \\ U'_{\phi S(I+1)} / -I'_{\phi S(I+1)} &= Z_{1S(I+1)} \\ \vdots & \\ U'_{\phi Sn} / -I'_{\phi Sn} &= Z_{1Sn} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

对于母线联元件I有:

$$U'_{\phi S I} / I'_{\phi S I} = Z_{1S(I)} \quad (2.10)$$

其中  $Z_{1S(I)} = Z_{1S1} + Z_{1S2} + \dots + Z_{1S(I-1)} + Z_{1S(I+1)} + \dots + Z_{1Sn}$

由以上的推论, 我们可以得到五点明显的结论:

(1) 若发生母线故障, 对于每个母线联元件都有  $U'_{\phi S I} / -I'_{\phi S I} = Z_{1S I}$ , 都为正方向; 若发生非母线故障, 对于故障元件有  $U'_{\phi S I} / I'_{\phi S I} = Z_{1S(I)}$ , 为反方向。

(2) 不受故障点过渡电阻影响

(3) 由于  $Z_{1S1}, Z_{1S2} \dots Z_{1Sn}$  一般都在  $80^\circ$  左右, 因此, 所有的阻抗都分布在第一象限。

(4) 三个继电器有着相同的方向性。

(5) 可判别任何接地和相间故障的方向

我们可以画出母线故障时等值阻抗分布图,

如图 2 所示:

可得:

$$Z_z = Z_{1S1} + Z_{1S2} + \dots + Z_{1Sn} \quad (2.11)$$

可知  $Z_z$  也在第一象限

由 (2.8) 式可得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{I'_{AS1}}{-U'_{AS1}} &= \frac{1}{Z_{1S1}} \\ \frac{I'_{AS2}}{-U'_{AS2}} &= \frac{1}{Z_{1S2}} \\ \vdots \\ \frac{I'_{ASn}}{-U'_{ASn}} &= \frac{1}{Z_{1Sn}} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

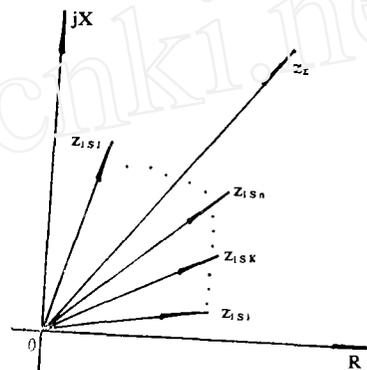


图 2 等值阻抗向量图

$$\text{设: } Z_{1S1} = \frac{1}{Z_{1S1}} \angle \varphi_1, Z_{1S2} = \frac{1}{Z_{1S2}} \angle \varphi_2 \dots Z_{1Sn} = \frac{1}{Z_{1Sn}} \angle \varphi_n$$

则有:

$$\frac{I'_{AS1}}{-U'_{AS1}} + \frac{I'_{AS2}}{-U'_{AS2}} + \dots + \frac{I'_{ASn}}{-U'_{ASn}} = Z_{1S1} \angle -\varphi_1 + Z_{1S2} \angle -\varphi_2 + \dots + Z_{1Sn} \angle -\varphi_n \quad (2.13)$$

因为  $U'_{AS1} = U'_{AS2} = \dots = U'_{ASn} = U'_A$

由 (2.13) 可得:

$$(I'_{AS1} + I'_{AS2} + \dots + I'_{ASn}) / -U'_A = (Z_{1S1} \angle -\varphi_1 + Z_{1S2} \angle -\varphi_2 + \dots + Z_{1Sn} \angle -\varphi_n) \quad (2.14)$$

因  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$  一般都在  $80^\circ$  左右, 我们可知,  $Z_{1S1} \angle -\varphi_1, Z_{1S2} \angle -\varphi_2, \dots, Z_{1Sn} \angle -\varphi_n$  都在第四象限, 可以画出母线故障时  $Z_{1S1} \angle -\varphi_1, Z_{1S2} \angle -\varphi_2, \dots, Z_{1Sn} \angle -\varphi_n$  的向量, 如图 3 所示。

由此可知:

$$Z_z = (Z_{1S1} \angle -\varphi_1 + Z_{1S2} \angle -\varphi_2 + \dots + Z_{1Sn} \angle -\varphi_n)$$

也在第四象限。

设:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma I &= (I'_{AS1} + I'_{AS2} + \dots + I'_{ASn}) \\ \Sigma I_{(1)} &= (I'_{AS2} + I'_{AS3} + \dots + I'_{ASn}) \\ \Sigma I_{(2)} &= (I'_{AS1} + I'_{AS2} + \dots + I'_{ASn}) \\ &\vdots \\ \Sigma I_{(n)} &= (I'_{AS1} + I'_{AS2} + \dots + I'_{AS(n-1)}) \end{aligned} \right\} (2.15)$$

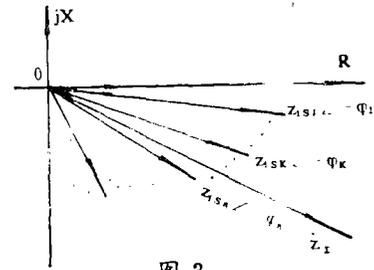


图 3

则有:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma I / (-U'_A) &= (z_{1s1} \angle -\varphi_1 + z_{1s2} \angle -\varphi_2 + \dots + z_{1sn} \angle -\varphi_n) \\ \Sigma I_{(1)} / (-U'_A) &= (z_{1s2} \angle -\varphi_2 + z_{1s3} \angle -\varphi_3 + \dots + z_{1sn} \angle -\varphi_n) \\ \Sigma I_{(2)} / (-U'_A) &= (z_{1s1} \angle -\varphi_1 + z_{1s3} \angle -\varphi_3 + \dots + z_{1sn} \angle -\varphi_n) \\ &\vdots \\ \Sigma I_{(n)} / (-U'_A) &= (z_{1s1} \angle -\varphi_1 + z_{1s2} \angle -\varphi_2 + \dots + z_{1s(n-1)} \angle -\varphi_{n-1}) \end{aligned} \right\} (2.16)$$

我们可以画出  $\Sigma I_{(j)} / (-U'_A) = (I'_{AS1} + \dots + I'_{AS(j-1)} + I'_{AS(j+1)} + \dots + I'_{ASn})$  的向量图, 如图 4 所示。

图中  $z_{\Sigma(j)} = (z_{1s1} \angle -\varphi_1 + \dots + z_{1s(j-1)} \angle -\varphi_{(j-1)} + z_{1s(j+1)} \angle -\varphi_{(j+1)} + \dots + z_{1sn} \angle -\varphi_n)$

$$\begin{aligned} \text{显然有 } |z_{\Sigma(j)}| &< |z_{\Sigma}| \\ |z_{\Sigma}| &= |z_{1s1} \angle -\varphi_1 + \dots + z_{1sj} \angle -\varphi_j + \\ &\quad \dots + z_{1sn} \angle -\varphi_n| \end{aligned}$$

由此我们可以推导出:

$$\left. \begin{aligned} |\Sigma I| &> |\Sigma I_{(1)}| = |\Sigma I - I_1| \\ |\Sigma I| &> |\Sigma I_{(2)}| = |\Sigma I - I_2| \\ &\vdots \\ |\Sigma I| &> |\Sigma I_{(n)}| = |\Sigma I - I_n| \end{aligned} \right\} (2.17)$$

若发生非母线故障, 故障点在母线联接元件 J 上, 可画出  $z_{1s1} \angle -\varphi_1, z_{1s2} \angle -\varphi_2, z_{1s3} \angle -\varphi_3, \dots, z_{1sn} \angle -\varphi_n$  的向量图, 如图 5 所示:

$$z_{\Sigma(j)} = [z_{1s1} \angle -\varphi_1 + \dots + z_{1s(j-1)} \angle -\varphi_{(j-1)} + z_{1s(j+1)} \angle -\varphi_{(j+1)} + \dots + z_{1sn} \angle -\varphi_n]$$

显然:

$$\begin{aligned} z_{\Sigma(j)} &= -z_{1sj} \angle -\varphi_j \\ z_{\Sigma} &= z_{\Sigma(j)} + z_{1sj} \angle -\varphi_j = 0 \end{aligned}$$

由此我们可以推导出:

$$\left. \begin{aligned} |\Sigma I| &< |\Sigma I_{(1)}| = |\Sigma I - I_1| \\ |\Sigma I| &< |\Sigma I_{(2)}| = |\Sigma I - I_2| \\ |\Sigma I| &< |\Sigma I_{(3)}| = |\Sigma I - I_3| \\ &\vdots \\ |\Sigma I_n| &< |\Sigma I_{(n)}| = |\Sigma I - I_n| \end{aligned} \right\} (2.18)$$

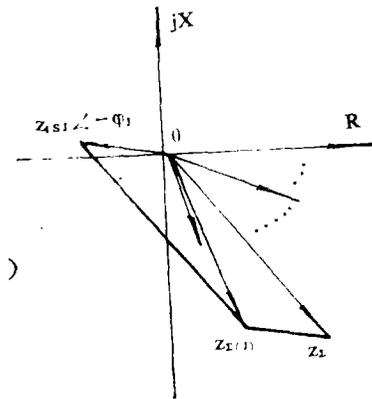


图 4

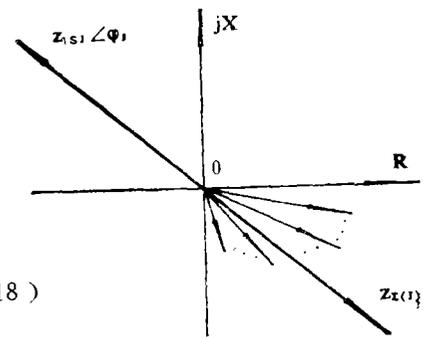


图 5 非母线故障阻抗向量图

如果(2.17)式都成立,则可以判别出发生的故障是母线故障,若(2.18)式其中之一成立,那么可以判别出发生的故障是非母线故障。为了提高可靠性,可适当提高制动量:

$$\left. \begin{aligned} |\Sigma I| < K |\Sigma I_{(1)}| \\ |\Sigma I| < K |\Sigma I_{(2)}| \\ |\Sigma I| < K |\Sigma I_{(3)}| \\ \vdots \\ |\Sigma I| < K |\Sigma I_{(n)}| \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

若对判据(2.17), (2.19)进行离散化,显然,对任一离散点上述判据是正确的,因此,使用微计算机很容易实现。

从以上推理可以得出以下两点判据:

- (1) 若 $|\Sigma I|$ 同时满足: $|\Sigma I| > |\Sigma I_{(1)}|$ ,  $|\Sigma I| > |\Sigma I_{(2)}|$ , ……  
 $|\Sigma I| > |\Sigma I_{(n)}|$ , 则发生的是母线故障。  
 (2) 若 $|\Sigma I| < K |\Sigma I_{(1)}|$ ,  $|\Sigma I| < K |\Sigma I_{(2)}|$ , ……  $|\Sigma I| < K |\Sigma I_{(n)}|$   
 有一式成立,则发生的是非母线故障。

显然,所研究的母线保护继电器具有明确的动作域和制动域。

### 3 继电器灵敏度的讨论

当母线发生各种故障时,各相继电器灵敏度的讨论:

第二节中已将三个继电器的动作判据归纳为式(2.17)、(2.19),实际上三个继电器的灵敏度存在着区别。

由式(2.17), (2.19)可见,当系统结构一定时,继电器灵敏度的差异仅仅是由于输入各继电器的电流幅值不同引起的。

3.1 当母线发生A相接地时,对于母线任一联接元件都有:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1S_I} &= \dot{I}_{2S_I} \quad \text{故:} \\ \dot{I}'_{AS_I} &= \dot{I}_{1S_I} + \dot{I}_{2S_I} = 2\dot{I}_{1S_I} \\ \dot{I}'_{BS_I} &= a^2\dot{I}_{1S_I} + a\dot{I}_{2S_I} = -\dot{I}_{1S_I} \\ \dot{I}'_{CS_I} &= a\dot{I}_{1S_I} + a^2\dot{I}_{2S_I} = -\dot{I}_{1S_I} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

其中 $I=1, 2, 3, \dots, n$

可知,单相接地时,故障相的灵敏度是非故障相的二倍。

3.2 BC相间短路时:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1S_I} &= -\dot{I}_{2S_I} \quad \text{所以:} \\ \dot{I}'_{AS_I} &= 0 \\ \dot{I}'_{BS_I} &= -j\sqrt{3}\dot{I}_{1S_I} \\ \dot{I}'_{CS_I} &= +j\sqrt{3}\dot{I}_{1S_I} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

因此,二个故障相灵敏度相同,非故障相电流为0。

3.3 BC两相短路接地时:

电流分为两相短路分量 $\dot{I}^{(2)}$ 和接地分量 $\dot{I}^{(0)}$ 两部分,其中 $\dot{I}'_{1S_I} = -\dot{I}'_{2S_I}$ ,  $\dot{I}'_{1S_I} = \dot{I}'_{0S_I}$ ,

故:

$$\left. \begin{aligned} I'_{A1I} &= 2\dot{I}_{1I} \\ I'_{B1I} &= -j\sqrt{3}\dot{I}_{1I} - \dot{I}_{1I} \\ I'_{C1I} &= +j\sqrt{3}\dot{I}_{1I} - \dot{I}_{1I} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

由于 $\dot{I}_{1I}$ 与 $\dot{I}_{1I}$ 之间的数值和相位关系是不定的,所以三个继电器灵敏度各不相同。

#### 4.4 三相短路时,三个继电器有相同的灵敏度

从以上分析可见,当母线发生故障时,至少总有一相灵敏度最高,能够保证动作。而发生非母线故障时,由于阻抗遵循第二节分析的相位关系,三个继电器都能可靠制动。因此,只要有一个继电器动作,就可判别为母线故障。

## 4 继电器动作性能的分析

发生非母线故障,非故障相动作情况:

当发生非母线两相故障时, $I'_{A1I} = 0$ ,实际上可能因系统正、负序阻抗不相等而产生少量不平衡输出,但由于 $Z_{1S1}, Z_{2S1} [K = 1, 2, \dots, (I-1), (I+1), \dots, n]$ 的阻抗角一定在第一象限,而 $Z_{1S(I)}, Z_{2S(I)}$ 的阻抗角在第三象限,因此, $|\Sigma I| < K |\Sigma I_{(1)}|, \dots, |\Sigma I| < K |\Sigma I_{(n)}|$ 总会有一式能够满足,因此,在非母线故障时,三个继电器不会误动。

系统阻抗角下降时继电器性能:

电力系统中 $Z_{1S1}, Z_{1S2}, \dots, Z_{1S_n}$ 阻抗角一般都在 $80^\circ$ 左右,从极端情况考虑,阻抗角不会超过 $90^\circ$ ,不应小于 $0^\circ$ ,即系统阻抗角始终呈现感性。即使存在串联电容补偿的系统,也不允许出现过补偿使系统综合阻抗呈现容性的现象,即严格保证阻抗角大于 $0^\circ$ ,由于系统等值阻抗角始终在第一象限,故判据始终成立。

测量回路暂态影响问题:

由于判据为 $|\Sigma I| > |\Sigma I_{(1)}|, |\Sigma I| > |\Sigma I_{(2)}|, \dots, |\Sigma I| > |\Sigma I_{(n)}|$ 以及 $|\Sigma I| < K |\Sigma I_{(1)}|, |\Sigma I| < K |\Sigma I_{(2)}|, \dots, |\Sigma I| < K |\Sigma I_{(n)}|$ ,而 $|\Sigma I|$ 与 $|\Sigma I_{(1)}|, \dots, |\Sigma I_{(n)}|$ 同时反应了各CT的电流,它们的大小完全取决于电流方向,因此,它基本上不受CT饱和的影响,具有较好的抗CT饱和性能。

## 5 结论

本文利用工频变化量的概念,从理论上探索了一种新型的母线保护继电器,这种继电器可以采用模拟型实现,也可用微计算机实现,采用微计算机实现,由于原理简单,可以发挥其更大的优越性,从分析可知继电器有如下特征:

- (1) 继电器理论分析和构成原理简单,便于微计算机实现,易于现场掌握。
- (2) 有极广泛的适用性,较少受系统结构以及运行方式等的影响。
- (3) 若系统短路容量大,发生线路CT完全饱和的穿越性故障时,仍能保证其动作性能。

