

# 继电保护运行整定中分支系数计算方法的研究

曹国臣 李娟 张连斌 东北电力学院 吉林 (132012)

**【摘要】** 在分析继电保护运行整定中分支系数计算误差原因的基础上,提出了一种准确计算分支系数的新方法。这种方法在计及网络操作和电源运行方式变化的条件下,可直接利用原网节点参数完成分支系数的计算,具有计算速度快、计算结果精确等特点。

**【关键词】** 继电保护 运行整定 电源变化 分支系数

## 1 引言

继电保护运行整定结果关系到电力系统运行的安全性。对反应被保护元件单侧电气量的继电保护(例如,电流保护、距离保护等等)来讲,其运行整定的关键在于计算最大和最小分支系数<sup>[1]</sup>。影响分支系数大小的因素有两个:(1)网络操作,例如,线路的投入与切除;(2)电源运行方式变化,例如,发电机组投切。由于电源在电力系统中的分散性和运行方式变化的多样性,在继电保护运行整定过程中,难以准确考虑电源运行方式变化对分支系数的影响。目前,继电保护运行整定过程中,在计及网络操作的情况下,仅考虑了整定保护所在线路对侧母线上直接连接电源的运行方式变化<sup>[2,3]</sup>。因此,计算出的最大和最小分支系数均存在误差,严重情况下可能造成继电保护之间失去应有的严格配合关系,而导致继电保护出现误动或拒动<sup>[3,4]</sup>,这是一个应解决的实际问题。

本文将网络操作、电源运行方式变化和故障统一模拟处理,提出了一种利用原网(网络操作和故障发生前的网络)节点参数在计及网络操作的情况下,考虑电源运行方式各种变化时,计算最大和最小分支系数的直接方法。对大型复杂电力系统,提出了电源影响域的概念和确定方法,不但确保了继电保护运行整定速度和效率,而且使分支系数计算满足了继电保护运行整定要求。

## 2 电源运行方式变化对分支系数的影响

现以图1中整定A—B线路A侧保护为例,说明电源运行方式变化对分支系数的影响。图中,电源电抗参数中下标min和max分别表示电源为最大和最小运行方式下的电源电抗。

根据分支系数的定义,d点短路时A侧保护的分支系数为:

$$K_{fz} = I_{BC}/I_{AB} = 1 + (I_{EB} + I_{DB})/I_{AB} \quad (1)$$

系统内任意一个电源运行方式发生变化都将改变故障电流 $I_{EB}$ , $I_{DB}$ 和 $I_{AB}$ 的数值,由式(1)可见,分支系数的大小随电源运行方式的变化而变化。

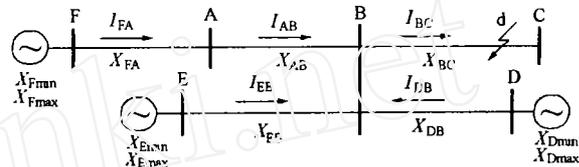


图1 电源运行方式变化对分支系数的影响

为便于分析最大和最小分支系数与电源运行方式之间的相互关系,将图1简化成图2。

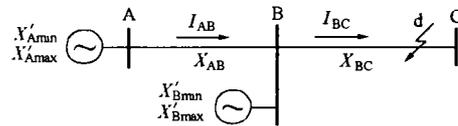


图2 简化后的网络

由图2:

$$K_{fz} = I_{BC}/I_{AB} = 1 + (X_A' + X_{AB})/X_B' \quad (2)$$

式中  $X_A' = X_F + X_{FA}$

$$X_B' = (X_D + X_{DB}) // (X_E + X_{EB})$$

由式(2)可见,最小分支系数出现在电源F为最大运行方式( $X_A' = X_{Amin}'$ )、电源D和电源E为最小运行方式下( $X_B' = X_{Bmax}'$ )的情况下;最大分支系数出现在电源F为最小运行方式( $X_A' = X_{Amax}'$ )、电源D和电源E为最大运行方式下( $X_B' = X_{Bmin}'$ )的情况下。

应指出,这里的电源运行方式对正序网指发电机组投切;对零序网指变压器的接地阻抗的变化。

## 3 分支系数计算误差分析

对图1所示网络,以整定A—B线路A侧的保护为例。由于图1中各电源均未与A—B线路对侧母线B直接相连,因此,现有继电保护运行整定方

法,在计算分支系数时,并不考虑电源运行方式变化,即:所有电源均为最大运行方式。具体计算方法如下:

(1)无网络操作时的计算

$$K_{Lz} = 1 + [(X_{Fmin} + X_{FA}) + X_{AB}] / [(X_{Dmin} + X_{DB}) // (X_{Emin} + X_{EB})] \quad (3)$$

(2)轮断一条相邻线路时的计算

(a)断开 B—D 线路

$$K_{Lz} = 1 + [(X_{Fmin} + X_{FA}) + X_{AB}] / (X_{Emin} + X_{EB}) \quad (4)$$

(b)断开 B—E 线路

$$K_{Lz} = 1 + [(X_{Fmin} + X_{FA}) + X_{AB}] / (X_{Dmin} + X_{DB}) \quad (5)$$

比较式(3)~(5)可见:(a)由式(3)计算出的分支系数最大,但根据第2节的分析结论,最大分支系数应出现在  $X_F = X_{Fmax}$  的运行方式下,显然,按式(3)计算出的最大分支系数偏小;(b)假如:  $(X_{Emin} + X_{EB}) > (X_{Dmin} + X_{DB})$ ,由式(4)计算出的分支系数最小,但根据第2节的分析结论,最小分支系数应出现在  $X_E = X_{Emax}$  的运行方式下,显然,按式(4)计算出的最小分支系数偏大。

### 4 分支系数的计算

为确保分支系数计算的准确性,在计算过程中不但要计及网络操作的影响还要考虑电源运行方式变化的影响。

#### 4.1 计算分支系数的统一模型

(1)网络操作的模拟 网络操作会引起网络拓扑结构发生局部对称变化。设网络拓扑结构局部对称变化涉及到的  $m$  条支路为  $s_k - t_k (k = 1, 2, \dots, m)$ 。根据文献<sup>[5,6]</sup>所介绍的网络操作模拟方法,继电保护运行整定中所涉及到的网络操作可采用向原网  $Z^{(0)}$  追加一组等值支路  $Z_c$  来模拟,见图3。图中  $Z_c$  的取值情况视网络操作的类型而定。

(2)电源运行方式变化的模拟 电源运行方式变化将引起电源等值阻抗发生变化。设网络中  $g_1, \dots, g_s$  号母线为电源母线、电源等值阻抗由  $Z_g$  变成了  $Z_g'$ 。根据支路追加法,电源运行方式变化可采用向原网电源母线追加一组附加阻抗  $\Delta Z_{gk} (k = 1, \dots, s)$  来模拟,见图3,  $\Delta Z_{gk}$  的取值情况为:

$$\Delta Z_{gk} = \frac{Z_{gk}' Z_{gk}}{Z_{gk} - Z_{gk}'} \quad (k = 1, \dots, s) \quad (6)$$

(3)故障的模拟 设在电力系统中,互感支路

$i-j$  的  $i$  侧发生非全相振荡或互感支路  $i-j$  距  $i$  母线  $\alpha$  百分点处发生短路且  $i$  侧断路器三相关跳开(相继动作),相应的故障等值网络见图4。

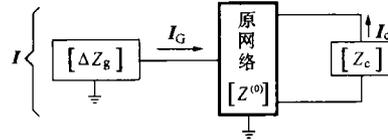


图3 网络操作和电源运行方式变化的模拟

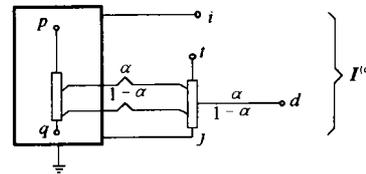


图4 故障等值网络示意图

在图4中,  $I^{(d)}$  为故障网络注入电流列相量,取值情况与故障类型有关;  $p-q$  代表一组与支路  $i-j$  有互感的支路,故障前的分块支路导纳矩阵为:

$$\begin{bmatrix} I_{ij} \\ I_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ij-ij} & Y_{ij-pq} \\ Y_{pq-ij} & Y_{pq-pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ij} \\ V_{pq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

对正序、负序网或当支路  $i-j$  无互感时,只需令  $Y_{ij-pq}, Y_{pq-ij}$  为零矩阵。

为利用原网节点参数进行分支系数计算,应将非全相振荡或相继动作造成的网络拓扑结构变化恢复,首先在图4中的  $i$  节点接入一个阻抗为  $-1.0\Omega$  的虚拟支路  $i-f$ ,然后在节点  $f$  和  $t$  之间再接入两条阻抗分别为  $1.0\Omega$  和  $-1.0\Omega$  的并联虚拟支路,将图4等效变成图5。

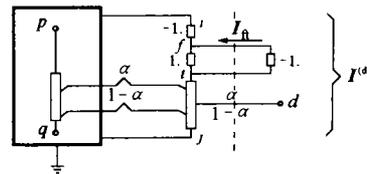


图5 故障等值网络的变形

(4)计算分支系数的统一模型 根据补偿法,由图3和图5可见,为同时模拟网络操作、电源运行方式变化和故障,只需用电流  $I_c, I_G$  和  $I_f$  修改故障网络注入电流,便建立起计算分支系数的统一模型,见图6。

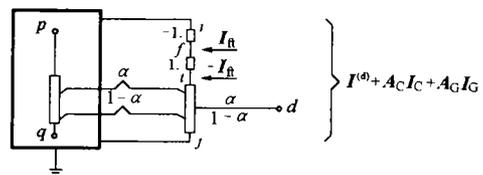


图6 分支系数计算的统一模型

应指出,在图6中适当选取  $I_{fi}$  和  $I^{(d)}$  的数值,即可得到各种故障时分支系数的计算模型。

在上面和下面的公式中,未加说明的符号符合如下规定:

$V_m^{(i)}$  为在图6所示的网络中任意节点  $i$  加入正单位电流时,任意节点  $m$  的电压,即:  $V_m^{(i)}$  等于原网节点阻抗矩阵  $Z^{(0)}$  中第  $i$  行第  $m$  列元素;  $V_m^{(ij)} = V_m^{(i)} - V_m^{(j)}$ ;  $V_{pq}^{(ij)} = V_p^{(ij)} - V_q^{(ij)}$ ;  $Z_{ij-ij}$  为任意支路  $i-j$  的支路阻抗。

#### 4.2 任意节点电压的计算

由于分支系数等于故障线路电流与保护所在线路故障电流的比值,分支系数的大小与故障点或断线处的电流大小无关,因此,计算分支系数时,可在故障点或断线处注入单位电流。

##### 4.2.1 非全相振荡的计算

在图6中,令  $I^{(d)}$  等于:

$$I^{(d)} = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0, -1, 0, \dots, 0]^T$$

即得到支路  $i-j$  的  $i$  侧发生非全相振荡时分支系数的计算模型。

根据叠加原理,由图6,可求得任意节点  $k$  的电压为:

$$V_k^{(u)'} = V_k^{(u)} + V_k^{(fi)} I_{fi} + V_k^c I_c + V_k^G I_G \quad (8)$$

式中  $V_k^{(u)}$  为  $I_u$  单独作用在图6中节点  $i$  和  $t$  时,节点  $k$  的电压。根据互易定理:  $V_k^{(iu)} = V_u^{(k)}$ ,由图6可见,节点  $i$  与  $t$  重合,因此:

$$V_k^{(iu)} = V_u^{(k)} = 0$$

$V_k^{(fi)}$  为  $I_{fi} = 1.0$  单独作用在图6中节点  $f$  和  $t$  时,节点  $k$  的电压:

$$V_k^{(fi)} = V_{ft}^{(k)} = I_{ft}^{(k)} = I_{ij}^{(k)} = Y_{ij-ij} V_{ij}^{(k)} + Y_{ij-pq} V_{pq}^{(k)}$$

$V_k^c = [V_k^{(s_1 t_1)}, V_k^{(s_2 t_2)}, \dots, V_k^{(s_m t_m)}]$  为单位补偿电流分别作用于原网中网络操作所涉及到的节点时,节点  $k$  的电压;

$V_k^G = [V_k^{(g_1)}, V_k^{(g_2)}, \dots, V_k^{(g_s)}]$  为单位补偿电流分别作用在原网电源节点时,节点  $k$  的电压。

补偿电流  $I_c' = [I_c \quad I_G \quad I_{fi}]$  可由图3、图5和图6求得。

根据欧姆定律和叠加原理,由图3、图5和图6,等值支路  $Z_c'$  两端的电压为:

$$V_c' = -Z_c' I_c'$$

$$V_c' = A^T Z (I^{(d)} + A I_c')$$

由上面两式,可求得补偿电流:

$$I_c' = -[A^T Z A + Z_c']^{-1} A^T Z I^{(d)} \quad (9)$$

$$\text{式中 } Z_c' = \begin{bmatrix} Z_c & & \\ & \Delta Z_g & \\ & & -1, 0 \end{bmatrix};$$

$A$  为图6所示网络中注入有补偿电流的节点与  $Z_c'$  的关联矩阵;

$Z$  为图6所示网络中注入有补偿电流的节点构成的节点阻抗矩阵,即:

$$Z = \begin{matrix} & \begin{matrix} s_1 & \dots & t_m & & g_1 & \dots & g_s & & f & & t \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ \vdots \\ t_m \\ g_1 \\ \vdots \\ g_s \\ f \\ t \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_{s_1 s_1} & & & & & & & & & & \\ \vdots & \ddots & & & & & & & & & \\ Z_{t_m s_1} & \dots & Z_{t_m t_m} & & & & & & & & \\ Z_{g_1 s_1} & \dots & Z_{g_1 t_m} & Z_{g_1 g_1} & & & & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & & & & & \\ Z_{g_s s_1} & \dots & Z_{g_s t_m} & Z_{g_s g_1} & \dots & Z_{g_s g_s} & & & & & \\ Z_{f s_1} & \dots & Z_{f t_m} & Z_{f g_1} & \dots & Z_{f g_s} & Z_{ff} & & & & \\ Z_{t s_1} & \dots & Z_{t t_m} & Z_{t g_1} & \dots & Z_{t g_s} & Z_{tf} & Z_{tt} & & & \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$Z$  阵为一对称方阵。根据节点阻抗参数的物理意义,由图6可见,  $Z$  阵中与原网节点  $s_1, \dots, t_m; g_1, \dots, g_s$  有关的元素等于原网节点阻抗矩阵中的相应元素;与新增节点  $f, t$  有关的元素可由原网节点阻抗矩阵元素求得:

$$\begin{aligned} Z_{fk} &= V_f^{(k)} = V_i^{(k)} - V_{if}^{(k)} = V_i^{(k)} + Y_{ij-ij} V_{ij}^{(k)} + Y_{ij-pq} V_{pq}^{(k)} \quad (k = s_1, \dots, t_m; g_1, \dots, g_s) \\ Z_{tk} &= V_t^{(k)} = V_i^{(k)} \quad (k = s_1, \dots, t_m; g_1, \dots, g_s) \\ Z_{tt} &= V_t^{(t)} = V_i^{(t)} = V_i^{(i)} \\ Z_{ff} &= V_f^{(f)} = V_i^{(f)} - V_{if}^{(f)} = V_i^{(i)} + Y_{ij-ij} V_{ij}^{(f)} + Y_{ij-pq} V_{pq}^{(f)} - 1.0 \\ Z_{ff} &= V_f^{(f)} = V_i^{(f)} + V_{ft}^{(f)} = V_i^{(f)} + Y_{ij-ij} V_{ij}^{(f)} + Y_{ij-pq} V_{pq}^{(f)} \end{aligned}$$

##### 4.2.2 非母线短路加相继动作的计算

在图6中,令  $I^{(d)}$  等于:

$$I^{(d)} = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$$

即得到  $i-j$  支路非母线短路加相继动作时分支系数的计算模型。

根据叠加原理,由图6可求得相应的任意节点电压:

$$V_k^{(d)'} = V_k^{(d)} + V_k^{(fi)} I_{fi} + V_k^c I_c + V_k^G I_G \quad (10)$$

式中  $V_k^{(d)} = \alpha V_j^{(k)} + (1 - \alpha) V_i^{(k)}$ ;

$V_k^{(fi)}, V_k^c, V_k^G$  可由式(8)中的有关公式求得。

补偿电流可根据欧姆定律和叠加原理求得：

$$[I_c \quad I_c \quad I_f]^T = -[A^T Z A + Z_c]^{-1} A^T Z I^{(d)} \quad (11)$$

式中  $A$  为图 6 所示网络中注入有补偿电流的节点及故障点与  $Z_c'$  的关联矩阵；

$Z$  为图 6 所示网络中注入有补偿电流的节点及故障点  $d$  构成的节点阻抗矩阵,比式(9)中的  $Z$  阵增加一行和—列,即：

$$Z = \begin{matrix} & s_1 & \cdots & t_m & g_1 & \cdots & g_s & f & t & d \\ \begin{matrix} s_1 \\ \vdots \\ t_m \\ g_1 \\ \vdots \\ g_s \\ f \\ t \\ d \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_{s_1 s_1} & & & & & & & & & \\ \vdots & \ddots & & & & & & & & \\ Z_{t_m s_1} & \cdots & Z_{t_m t_m} & & & & & & & \\ Z_{g_1 s_1} & \cdots & Z_{g_1 t_m} & Z_{g_1 g_1} & & & & & & \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & & & & & & \\ Z_{g_s s_1} & \cdots & Z_{g_s t_m} & Z_{g_s g_1} & \cdots & Z_{g_s g_s} & & & & \\ Z_{f s_1} & \cdots & Z_{f t_m} & Z_{f g_1} & \cdots & Z_{f g_s} & Z_{ff} & & & \\ Z_{t s_1} & \cdots & Z_{t t_m} & Z_{t g_1} & \cdots & Z_{t g_s} & Z_{tf} & Z_{tt} & & \\ Z_{d s_1} & \cdots & Z_{d t_m} & Z_{d g_1} & \cdots & Z_{d g_s} & Z_{df} & Z_{dt} & Z_{dd} & \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$Z$  阵为—对称方阵,矩阵中与新增节点  $d$  有关的元素可由原网节点阻抗矩阵元素求得：

$$Z_{dk} = V_k^{(d)} = \alpha V_j^{(k)} + (1 - \alpha) V_i^{(k)} \quad (k = s_1, \dots, t_m; g_1, \dots, g_s; f, t)$$

$$Z_{dd} = V_d^{(d)} = \alpha V_j^{(d)} + (1 - \alpha) V_i^{(d)} + \alpha(1 - \alpha) Z_{ij-ij}$$

$Z_{ij-ij}$

### 4.2.3 母线或非母线短路的计算

在图 6 中,令：

$$I^{(d)} = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$$

$$I_{fi} = 0$$

即得到支路  $i-j$  上距  $i$  母线  $\alpha$  百分点处发生短路故障时分支系数的计算模型。因此,只需在式(10)~(11)中,令  $I_{fi} = 0$ ,就得到非母线短路故障时计算任意节点电压的公式;在此基础上,令  $I_{fi} = 0, \alpha = 0$  或  $1$ ,就得到母线短路故障时计算任意节点电压的公式。

### 4.3 任意支路电流的计算

对正序网或零序网无互感支路任意支路电流等于支路两端电压除以支路阻抗,很容易求得。对互感支路,由于网络操作和故障改变了原网互感支路组结构,为确保能利用网络操作和故障前的原网互感支路导纳参数计算互感支路故障电流,必须进行相应的处理,具体处理方法及有关公式见文献<sup>[7]</sup>。

### 4.4 分支系数的计算

求出故障线路电流和保护所在线路故障电流之后,可按下式求得分支系数：

$$K_{fe} = \frac{I_1}{I_2}$$

式中  $I_1$  为故障线路电流；

$I_2$  为保护所在线路故障电流。

## 5 大型复杂电力系统中分支系数的计算

采用第 4 节所介绍的方法可以准确计算出继电保护运行整定过程中所需最大和最小分支系数,但对大型复杂电力系统而言,计算量太大,因为要在无网络操作、轮断—条相邻线路时对电源的每一种运行方式分别进行分支系数的计算。为减少计算量,现在来研究电源运行方式变化对分支系数的影响程度。现以图 1 中整定  $A-B$  线路  $A$  侧保护为例。在无网络操作的情况下  $d$  点短路时,各电源的电流分布系数为：

对电源 D:

$$C_D = I_{DB}/I_{BC} \quad (12)$$

对电源 E:

$$C_E = I_{EB}/I_{BC} \quad (13)$$

对电源 A:

$$C_A = I_{FA}/I_{BC} \quad (14)$$

由式(12)~(14)可见,电流分布系数描述着各电源对故障电流的影响程度。根据电流分布系数这一物理意义,按各电源电流分布系数的大小可以把大型复杂电力系统中的电源划分成两大区域,即对故障电流影响较大的区域和影响较小的区域。由于位于影响较小区域内的电源运行方式变化对分支系数影响较少,在计算分支系数时,可仅考虑影响较大区域内的电源运行方式变化。

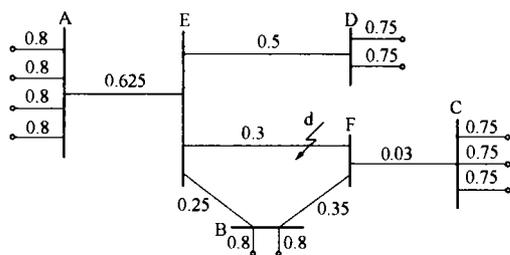


图 7 算例系统接线图

电源影响区域的划分原则为：

电流分布系数  $\geq \epsilon$

预先给定小数  $\epsilon$  的取值情况关系到分支系数计算量的大小和准确性,其取值应视实际情况而定。

## 6 算例

网络如图7所示,图中的参数为  $S_b = 100\text{MVA}$  下的标么值,试计算当  $E-F$  线路上距  $E$  节点 80% 处发生三相短路时,整定  $A-E$  线路上  $A$  侧保护所需的最大和最小分支系数。

计算结果见表1

表1 算例计算结果

计算方法	分支系数	电源运行方式	网络操作				
			A	B	C	D	
现有方法	$K_{b,max}$	2.476	4	2	3	2	无线路开断
	$K_{b,min}$	1.704	4	2	3	2	开断 $E-D$ 线路
本文方法	$K_{b,max}$	3.682	1	2	3	2	无线路开断
	$K_{b,min}$	1.377	4	1	3	2	开断 $E-D$ 线路

由表1可见,现有分支系数计算方法因未考虑电源运行方式变化,计算出的最大分支系数偏小,最小分支系数偏大。

## 7 结论

电源运行方式变化直接影响到继电保护运行整定结果的正确性,因此,在分支系数计算过程中必须计及电源运行方式的影响。文中提出的继电保护运行整定过程中计算分支系数的新方法,可方便地计及电源运行方法变化;提出的电源影响域的概念和

确定方法,可确保大型复杂电力系统继电保护运行整定的速度和效率。

### 参考文献

- 1 中华人民共和国电力工业部. 220 ~ 500kV 电网继电保护装置运行整定规程. 1994.12.
- 2 东北电力学院,东北电管局. 220 ~ 500kV 电网继电保护软件包原则. 1990.
- 3 Pinto de Sa J et al. A Probabilistic Approach to Setting Distance Relays in Transmission Networks. IEEE Trans. on PWRD. 1997, PWRD - 12(2).
- 4 尤田柱等. 低压电网距离保护动作范围超越分析. 吉林电力技术, 1997, (6).
- 5 米麟书. 电力系统故障计算中互感线路处理方法的研. 电网技术, 1992, 16(3).
- 6 曹国臣. 网络分析中计算节点合并与分割的补偿法. 中国电机工程学报, 1996, 16(3).
- 7 曹国臣. 继电保护整定计算中互感支路电流的快速计算. 继电器, 1995, 23(1).

收稿日期: 1998-07-29

曹国臣 男, 1954 年生, 硕士, 教授, 主要从事电力系统故障分析与继电保护方面的教学和研究工作。

李娟 女, 1972 年生, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究工作。

张连斌 男, 1958 年生, 硕士, 教授, 主要从事电力系统故障分析与继电保护方面的教学和研究工作。

## STUDY ON METHOD TO CALCULATE BRANCH COEFFICIENT IN RELAY SETTING AND COORDINATION

Cao Guochen, Li Juan, Zhang Lianbin

(Northeast China Institute of Electric Power Engineering Jilin, 132012, China)

**Abstract** In this paper, a new method to calculate branch coefficient is presented to solve the problems of accurately calculating branch coefficient in relay setting and coordination. On the condition of considering network operations and changes in plant operation condition, the method can use node parameters of original networks to directly calculate branch coefficient. The proposed method has following characteristics: a) Calculation speed is very fast; b) Calculation results are accurate.

**Keywords** Protective Relay Setting and Coordination Changes in Plant Operation Condition Branch Coefficient

许继集团有限公司将于 1999 年 4 月 18 ~ 21 日在河南省许昌市隆重举办“99’许继电力装备展示会”,届时将邀请国内各电力局、设计院、大专院校、科研院所和政府部门的专家、学者、知名人士及客户等 800 多人参加。