

# 电力系统故障分析中网络操作的统一模拟方法

李秀卿 曹国臣 东北电力学院 吉林市 (132012)

**【摘要】** 本文提出了一种采用修改网络数学模型法或补偿法来模拟电力系统故障分析中各种网络操作的统一方法。这种方法具有物理概念清晰、各种网络操作模拟方法统一、易于编程等特点。

**【关键词】** 电力系统 故障分析 网络操作 模拟方法

## 引言

在电力系统设计、事故分析、继电保护整定计算及其动作行为分析过程中,往往需要进行网络操作后的故障计算。网络操作的种类可分为:(1)投入与切除非零阻抗支路,例如:线路、变压器、发电机等元件的投入或切除、互感线路挂地检修等;(2)节点合并与分割,例如:厂站母联开关或3/2接线中开关等零阻抗元件的投入与切除;(3)投入与切除非零阻抗支路加节点合并与分割。如何模拟这三类网络操作,关系到网络操作后故障计算的速度和效率。传统方法采用重新形成网络数学模型来处理网络操作,计算量大。文献<sup>[1-3]</sup>分别研究了采用修改网络数学模型法或补偿法来模拟第一类和第二类网络操作的方法,由于这两种方法无需重新形成网络数学模型,在计算速度及计算效率方面明显优于重新形成网络数学模型法,但如何采用修改网络数学模型法或补偿法来模拟第三类网络操作,并将这三类网络操作的模拟方法统一起来仍有待于进一步研究。

本文以节点阻抗阵作为网络的数学模型,系统地研究了采用修改节点阻抗阵法或补偿法来模拟第三类网络操作的方法,在此基础上,导出了模拟各类网络操作的统一方法。应指出,当采用节点导纳阵作为网络的数学模型时,在使用本文公式之前,只需对原网络节点导纳阵的因子表进行前代和回代求出相应的节点阻抗

阵元素即可。

## 1 网络操作的统一模拟方法

设电力系统在运行过程发生了网络操作。根据支路追加法,任何网络操作均可采用向操作前的原网络追加一组相应的等值支路来描述。

### 1.1 第一类网络操作的模拟

第一类网络操作指的是投入与切除非零阻抗支路。模拟第一类网络操作所需的等值支路阻抗由第一类网络操作的类型而定。

#### 1.1.1 投入与切除无互感支路或支路组的模拟

设拟投入或切除的无互感支路或支路组的支路阻抗阵为  $Z_m$  ( $m$  为支路条数)。根据支路追加法,为模拟投入或切除无互感支路或支路组,只需向原网追加一组等值支路,相应的支路阻抗阵为:

$$Z_{c(1)} = \pm Z_m \quad (1)$$

式中“+”号表示向原网投入无互感支路或支路组;

“-”号表示从原网切除无互感支路或支路组。

当投入与切除无互感支路或支路组同时发生时,只需根据式(1)构成新的支路阻抗阵即可:

$$Z_{c(1).w} = \begin{bmatrix} Z_{c(1).a} & 0 \\ 0 & Z_{c(1).r} \end{bmatrix} pa \quad (2)$$

式中  $Z_{c(1).a}$  为模拟投入无互感支路或支路组所需追加的支路阻抗阵;

$Z_{c(1).r}$  为模拟切除无互感支路或支路组

所需追加的支路阻抗阵。

### 1.1.2 投入与切除互感支路或支路组的模拟

投入与切除整组互感支路时, 向原网追加的支路阻抗阵仍可由式(2)求得。

投入与切除部分互感支路时, 可采用从原网先切除后追加的方法来求得所需的等值支路阻抗阵。

#### (1) 从原网中切除部分互感支路

设切除前互感支路组的支路阻抗阵为  $Z_m$ , 切除部分互感支路后互感支路组的支路阻抗阵变为  $Z_r$ 。根据先切除后追加的原则, 向原网应追加的等值支路阻抗阵为:

$$\text{挂地 } Z_{c(1), r} = [Z_r^{-1} \quad -Z_m^{-1}]^{-1} \quad (3)$$

在某些情况下, 式(3)的右端可能奇异, 这时应改用下式计算等值支路阻抗阵:

$$\text{计 } Z_{c(1), r} = \begin{bmatrix} -Z_m & 0 \\ 0 & Z_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### (2) 向原网投入部分互感支路

设投入前互感支路组的支路阻抗阵为  $Z_m$  投入部分互感支路后互感支路阻抗阵变为  $Z_r$ 。根据先切除后追加的原则, 向原网应追加的等值支路阻抗阵  $Z_{c(1)}$  仍可由式(3)或(4)求得。

当投入与切除互感支路或互感支路组同时发生时, 所需的支路阻抗阵  $Z_{c(1), h}$  仍可由式(2)求得, 但式中  $Z_{c(1), a}$  和  $Z_{c(1), r}$  应改由式(1)或式(3)和式(4)求得。

### 1.1.3 整组互感中出现 $m$ 条支路两端断开并接地(挂检)的模拟

设部分支路挂检前互感支路组的支路阻抗阵为  $Z_m$ , 计及部分支路挂检影响后的支路阻抗阵为  $Z_u$ , 根据先切除后追加的原则, 向原网应追加的等值支路阻抗为:

$$Z_{c(1), g} = [Z_u^{-1} \quad -Z_m^{-1}] \quad (5)$$

在某些情况下, 式(5)的右端可能奇异, 这时可改用下式计算等值支路阻抗阵:

$$Z_{c(1), g} = \begin{bmatrix} -Z_m & 0 \\ 0 & Z_u \end{bmatrix} \quad (6)$$

计及部分支路挂检影响后的支路阻抗阵  $Z_u$  的计算方法如下:

设部分支路挂检后互感支路阻抗阵为  $Z^g$ , 将  $Z^g$  按挂检支路与非挂检支路进行分块, 可得:

$$Z^g = \begin{bmatrix} Z_{uu} & Z_{ug} \\ Z_{gu} & Z_{gg} \end{bmatrix} \quad el \quad (7)$$

式中  $Z_{uu}$  为非挂检支路的支路阻抗阵;

$Z_{gg}$  为挂检支路的支路阻抗阵;

$Z_{ug} = Z_{gu}^T$  为挂检支路与非挂检支路间的互感阻抗阵。

根据欧姆定律, 可得挂检后互感组的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} V_u \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{uu} & Z_{ug} \\ Z_{gu} & Z_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_u \\ I_g \end{bmatrix} \quad T \quad (8)$$

由式(8)消去电流  $I_g$ , 可解得:

$$V_u = (Z_{uu} - Z_{ug}Z_{gg}^{-1}Z_{gu}) I_u = Z_u I_u$$

由上式可见, 计及部分支路挂检影响后的支路阻抗阵  $Z_u$  的计算方法为:

$$Z_u = Z_{uu} - Z_{ug}Z_{gg}^{-1}Z_{gu} \quad (9)$$

当投入与切除无互感支路、互感支路和互感支路挂检同时发生时, 只需根据上述相应公式构成新的支路阻抗阵即可:

$$Z_{c(1)} = \begin{bmatrix} Z_{c(1), w} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{c(1), h} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{c(1), g} \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(10)可见, 第一类网络操作可采用向操作前的原网追加一组等值支路  $Z_{c(1)}$  来模拟, 见图1。

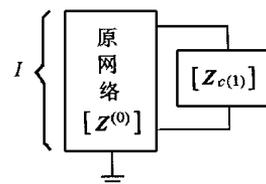


图1 模拟第一类网络操作的模型

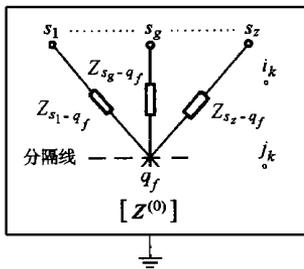
### 1.2 第二类网络操作的模拟

第二类网络操作指的是节点合并与分割。

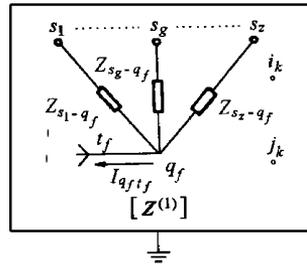
设在图2(a)所示的网络中, 将节点  $i_K, j_K$  合并, 同时将节点  $z_{qf}$  分割。为将节点合并与分割转化成接入或切除相应的支路, 首先在图2(a)中引入零阻抗虚拟支路  $q_f - t_f$ , 将其等效变成

图2(b);再引入虚拟节点  $p_f$  和两条阻抗分别为  $r$  和  $-r$  的虚拟支路  $q_f - p_f$ 、 $p_f - t_f$ , 将图2(b) 变形成图2(c)。显然这种形对原网络毫无影响。由图2(c)可见,为模拟节点合并与分割,只需在节点  $i_k$ 、 $j_k$  之间接入零阻抗支路  $i_k - j_k$ , 同时在节点  $q_f$ 、 $p_f$  之间接入阻抗为  $-r$  的支路  $q_f - p_f$ , 见图2(d)。图中,节点  $i_k$ 、 $j_k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) 表示一对或多对节点;节点

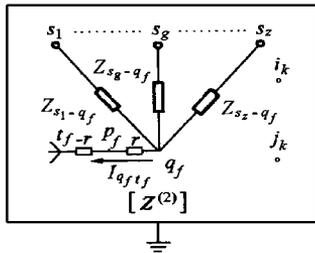
$q_f$ 、 $p_f$ 、 $t_f$  ( $f = 1, 2, \dots, h$ ) 表示一个或多个节点;节点  $s_g$  ( $g = 1, 2, \dots, z$ ) 表示  $s_g$  与  $q_f$  是数个节点对一个节点的关系;支路  $Z_{s_g - q_f}$  ( $g = 1, 2, \dots, z$ ) 为在分割线以上与节点  $q_f$  相连接的数条支路;  $Z^{(K)}$  ( $K = 0, 1, 2$ ) 分别为原网络、第一次变形后的网络和第二次变形后的网络的节点阻抗阵。



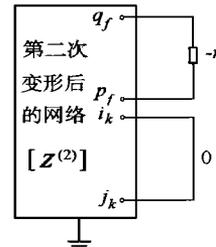
(a) 节点合并与分割前的原网络



(b) 原网络的第一次变形



(c) 原网络的第二次变形



(d) 节点合并与分割的模拟

图2 节点合并与分割的处理过程

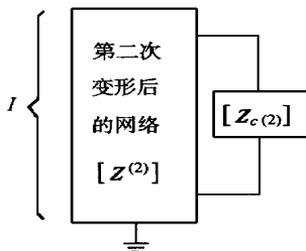


图3 模拟第二类网络操作的模型

将图2(d)中的零阻抗支路和阻抗为  $-r$  的支路用支路组  $Z_{c(2)}$  来描述,便得到模拟第二类网络操作的模型,见图3。

在图3中,  $Z_{c(2)}$  的取值情况由第二类网络操作的类型决定:

(1) 当将节点  $i_k$ 、 $j_k$  合并、节点  $q_f$  分割时

$$i_k - j_k q_f - p_f$$

$$Z_{c(2)} = \begin{matrix} i_k - j_k & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ q_f - p_f & -r \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

(2) 当仅将节点  $i_k$ 、 $j_k$  合并时

$$Z_{c(2)} = i_k - j_k \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

(3) 当仅将节点  $q_f$  分割时

$$Z_{c(2)} = q_f - p_f \begin{bmatrix} q_f - q_f \\ -r \end{bmatrix} \quad (13)$$

图3中第二次变形后的网络节点阻抗阵  $Z^{(2)}$  中新增加的元素可由原网节点阻抗阵  $Z^{(0)}$  中相应元素求得,具体计算方法如下:

(1) 第一次变形网络  $Z^{(1)}$  阵中新增加元素的计算

第一次变形网络如图2(b)所示,比原网络

新出现一个与节点  $q_f$  直接相连接的节点  $t_f$ , 故  $Z^{(1)}$  阵为:

$$Z^{(1)} = \begin{matrix} & t_f \\ \begin{matrix} Z^{(0)} & Z_{Kt_f}^{(1)} \\ Z_{t_f K}^{(1)} & Z_{t_f t_f}^{(1)} \end{matrix} \end{matrix} \quad (14)$$

式中  $Z^{(0)}$  为已知的原网络节点阻抗阵;

$Z_{t_f K}^{(1)}$ 、 $Z_{t_f t_f}^{(1)}$  为新增加的待求元素。

由于图 2(b) 中节点  $q_f$  与  $t_f$  间的支路阻抗为零, 根据节点阻抗参数的物理意义, 可求得新增加的任意元素为:

$$Z_{t_f K}^{(1)} = Z_{q_f K}^{(0)} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

$$Z_{t_f t_f}^{(1)} = Z_{q_f q_f}^{(0)} \quad (16)$$

式中  $Z_{q_f K}^{(0)}$ 、 $Z_{q_f q_f}^{(0)}$  分别为原网络节点阻抗阵  $Z^{(0)}$  中第  $q_f$  行第  $k$  列和第  $q_f$  列的元素。

(2) 第二次变形网络  $Z^{(2)}$  阵中新增加元素的计算

第二次变形后的网络如图 2(c) 所示, 比第一次变形网络新出现一个节点  $p_f$ , 故  $Z^{(2)}$  阵为:

$$Z^{(2)} = \begin{matrix} & p_f \\ \begin{matrix} Z^{(1)} & Z_{Kp_f}^{(2)} \\ Z_{p_f K}^{(2)} & Z_{p_f p_f}^{(2)} \end{matrix} \end{matrix} \quad (17)$$

式中  $Z^{(1)}$  为已求得的第一次变形网络节点阻抗阵;

$Z_{p_f K}^{(2)}$ 、 $Z_{p_f p_f}^{(2)}$  为新增加的待求元素。

当仅在网络中任意旧节点  $k$  注入单位电流时, 根据基尔霍夫定律和节点阻抗参数的物理意义, 由图 2(c) 可求得新增加的任意元素为:

$$\begin{aligned} Z_{p_f k}^{(2)} &= V_{pr}^{(k)} = V_{qr}^{(k)} - I_{q_f t_f}^{(k)} r \\ &= Z_{q_f k}^{(1)} - I_{q_f t_f}^{(k)} r \quad (k = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (18)$$

式中  $Z_{q_f k}^{(1)}$  为  $Z^{(1)}$  阵中第  $q_f$  行第  $k$  列元素;

$I_{q_f t_f}^{(k)}$  为仅在节点  $k$  注入单位电流时, 通

过支路  $q_f - p_f$  的电流。

$$\begin{cases} \text{当 } k = q_f \text{ 时;} \\ I_{q_f t_f}^{(K)} = \sum_{g=1}^z I_{s_g q_f}^{(K)} \end{cases} \quad (19)$$

a. 支路  $S_1 - q_f, \dots, S_z - q_f$  间无互感时:

$$I_{s_g q_f}^{(K)} = \frac{V_{s_g q_f}^{(K)}}{Z_{s_g - q_f}} \quad (g = 1, 2, \dots, z)$$

式中  $V_{s_g q_f}^{(K)} = Z_{s_g q_f}^{(2)} - Z_{q_f k}^{(2)}$

其中:  $Z_{s_g K}^{(2)}$ 、 $Z_{q_f k}^{(2)}$  为  $Z^{(2)}$  阵中相应行和列的元素。

b. 支路  $S_1 - q_f, \dots, S_z - q_f$  间有互感时:

$$\begin{bmatrix} I_{s_1 q_f}^{(K)} \\ \dots \\ I_{s_z q_f}^{(K)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{s_1 - q_f} & & \\ & \dots & \\ & & Z_{s_z - q_f} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{s_1 q_f}^{(K)} \\ \dots \\ V_{s_z q_f}^{(K)} \end{bmatrix}$$

式中  $V_{s_1 q_f}^{(K)} = Z_{s_1 k}^{(2)} - Z_{q_f k}^{(2)}$ 、 $\dots$ 、 $V_{s_z q_f}^{(K)} = Z_{s_z k}^{(2)} - Z_{q_f k}^{(2)}$

其中:  $Z_{s_1 k}^{(2)}$ 、 $Z_{q_f k}^{(2)}$ 、 $\dots$ 、 $Z_{s_z k}^{(2)}$ 、 $Z_{q_f k}^{(2)}$  为  $Z^{(2)}$  阵中相应行和列的元素。

当  $k = q_f$  时;

$$I_{q_f t_f}^{(K)} = \sum_{g=1}^z I_{s_g q_f}^{(K)} + 1 \quad (20)$$

当仅在网络中新增节点  $p_f$  注入单位电流时, 根据基尔霍夫定律和节点阻抗参数的物理意义, 由图 2(c) 可求得新增加的对角元素为:

$$\begin{aligned} Z_{p_f p_f}^{(2)} &= V_{p_f p_f}^{(p_f)} = V_{q_f p_f}^{(p_f)} - I_{q_f t_f}^{(p_f)} r \\ &= Z_{q_f p_f}^{(2)} - I_{q_f t_f}^{(p_f)} r \end{aligned} \quad (21)$$

式中  $Z_{q_f p_f}^{(2)}$  为  $Z^{(2)}$  阵中第  $q_f$  行第  $p_f$  列元素;

$I_{q_f t_f}^{(p_f)}$  为仅在节点  $p_f$  注入单位电流时, 通过支路  $q_f - p_f$  的电流, 即:

$$I_{q_f t_f}^{(p_f)} = \sum_{g=1}^z I_{s_g q_f}^{(p_f)} \quad (22)$$

a. 支路  $S_1 - q_f, \dots, S_z - q_f$  间无互感时:

$$I_{s_g q_f}^{(p_f)} = \frac{V_{s_g q_f}^{(p_f)}}{Z_{s_g - q_f}} \quad (g = 1, 2, \dots, z)$$

式中  $V_{s_g q_f}^{(p_f)} = Z_{s_g q_f}^{(2)} - Z_{q_f p_f}^{(2)}$

其中:  $Z_{s_g p_f}^{(2)}$ 、 $Z_{q_f p_f}^{(2)}$  为  $Z^{(2)}$  阵中相应行和列的元素。

b. 支路  $S_1 - q_f, \dots, S_z - q_f$  间有互感时:

$$\begin{bmatrix} I_{s_1 q_f}^{(p_f)} \\ \dots \\ I_{s_z q_f}^{(p_f)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{s_1 - q_f} & & \\ & \ddots & \\ \bar{Z}_{s_z q_f - s_1 q_f} & \dots & Z_{s_1 - q_f} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{s_1 q_f}^{(p_f)} \\ \dots \\ V_{s_z q_f}^{(p_f)} \end{bmatrix}$$

式中  $V_{s_1 q_f}^{(p_f)} = Z_{s_1 p_f}^{(2)} - Z_{q_f p_f}^{(2)}, \dots, V_{s_z q_f}^{(p_f)} = Z_{s_z p_f}^{(2)} - Z_{q_f p_f}^{(2)}$

其中:  $Z_{s_1 p_f}^{(2)}, Z_{q_f p_f}^{(2)}, \dots, Z_{s_z p_f}^{(2)}, Z_{q_f p_f}^{(2)}$  为  $Z^{(2)}$  阵中相应行和列的元素。

### 1.3 第三类网络操作的模拟

第三类网络操作指的是投入与切除非零阻抗支路加节点合并与分割。根据支路追加法,第三类网络操作可处理成同时进行第一类和第二类网络操作。由 1.1—1.2 节可见,第三类网络操作可采用向原网络  $Z^{(0)}$  或变形后的网络  $Z^{(2)}$  追加一组等值支路  $Z_c$  来模拟,见图 4。图中,  $Z_c$  的取值情况为:

$$\text{阵 } Z_c = \begin{bmatrix} Z_{c(1)} & 0 \\ 0 & Z_{c(2)} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中  $Z_{c(1)}$  为模拟第一类网络操作所需的等值支路组的支路阻抗阵;

$Z_{c(2)}$  为模拟第二类网络操作所需的等值支路组的支路阻抗阵。

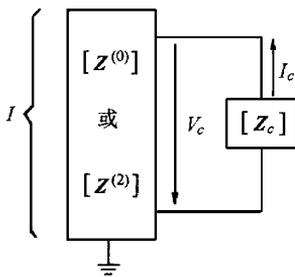


图4 模拟第三类网络操作的模型

### 1.4 模拟网络操作的统一模型

由于第三类网络操作可分解成第一类网络操作和第二类网络操作之和,因此,图4中的  $Z_c$  取不同的值,即可模拟各种类型的网络操作。

(1) 当仅发生第一类网络操作时

$$Z_c = Z_{c(1)} \quad (24)$$

(2) 当仅发生第二类网络操作时

$$Z_c = Z_{c(2)} \quad (25)$$

(3) 当仅发生第三类网络操作时

$$Z_c = \begin{bmatrix} Z_{c(1)} & 0 \\ 0 & Z_{c(2)} \end{bmatrix} \quad (26)$$

## 2 网络操作的计算

网络操作的计算方法有两种:一种是修改网络数学模型法;另一种是补偿法。这两种计算方法均可根据欧姆定律和叠加原理由图4导出。

根据欧姆定律,等值支路组两端的电压:

$$V_c = -Z_c I_c$$

根据叠加原理,等值支路组两端的电压:

$$V_c = A^T Z^{(r)} (I + A I_c) \quad (r=0,2)$$

将上面两式联立,可解得等值支路组中通过的电流:

$$I_c = -[A^T Z^{(r)} A + Z_c]^{-1} A^T Z^{(r)} I \quad (r=0,2) \quad (27)$$

式中  $A$  为图4所示网络节点与  $Z_c$  的关联矩阵;

$Z^{(r)} (r=0,2)$  为原网或变形后网络的节点阻抗阵;

$I$  为向原网或变形后网络的节点注入电流列相量。

根据叠加原理,接入等值支路组  $Z_c$  后的网络节点电压方程为:

$$V = Z^{(r)} (I + A I_c) \quad (28)$$

将式(27)代入式(28),即得到计算网络操作的补偿法:

$$\begin{aligned} V &= Z^{(r)} [I - A(A^T Z^{(r)} A + Z_c)^{-1} A^T Z^{(r)} I] \\ &= Z^{(r)} I \quad (r=0,2) \end{aligned} \quad (29)$$

式中  $I = I - A(A^T Z^{(r)} A + Z_c)^{-1} A^T Z^{(r)} I$  为网络操作后节点新的注入电流。

将式(27)代入式(28),并进行恒等变形,即得到计算网络操作的修改网络数学模型法:

$$V = [Z^{(r)} - Z^{(r)} A (A^T Z^{(r)} A + Z_c)^{-1} A^T Z^{(r)}] I = Z^{(r)} I \quad (r=0,2) \quad (30)$$

式中  $Z^{(r)} = Z^{(r)} - Z^{(r)} A (A^T Z^{(r)} A + Z_c)^{-1} A^T Z^{(r)}$  为网络操作后节点阻抗阵。

# 综合监控系统的测量反相补偿技术

周步祥 阮树骅 赵鸿图 四川联合大学电力学院 成都 610065

**【摘要】** 从综合监控系统的数据要求出发,研究了典型功能的数据特征,合理地划分了数据的典型要求,提出了一种利用常规测量手段加反相补偿的技术,它可以适应综合监控系统中各种功能的数据要求,实测结果表明这种技术是可行的、有效的。

**【关键词】** 测量 反相补偿 综合监控系统

## 概述

随着电力系统规模的不断扩大,电力系统的安全、可靠、经济地运行已成为电力系统正常

1997—10—13 收稿

运行的一个重要问题,为了适应这种形势的需要,计算机应用系统发展非常迅速,从常规的 SCADA 系统,到综合自动化系统以及专项的安全监控系统(如稳定安全监控系统等)都得到了相应的发展。为了提高计算机监控系统的效率,国内外的研究重点都放在对这些系统的综合方面,但

由于补偿法无需修改网络数学模型,在计算速度和计算效率方面明显优于修改网络数学模型法,在大型电力系统故障分析计算中获得了广泛应用。

割、投入与切除非零阻抗支路加节点合并与分割的模拟方法,并导出了模拟这三类网络操作的统一方法。本文方法已在工程中实际应用。

## 参考文献

## 3 算法校核

文中所介绍的模拟网络操作的补偿法已用于我院开发研制的高压电网继电保护整定计算机辅软件和地调模拟仿真系统中,经大量的实算表明,文中方法正确,可满足工程需要。

- 1 西安交通大学等校合编. 电力系统计算. 北京:水利电力出版社,1978
- 2 米麟书等. 电力系统故障计算中互感线路处理方法的研究. 电网技术,1992. 8
- 3 曹国臣、宋家骅. 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. 3

## 4 结论

本文系统地研究了在电力系统设计、事故分析、继电保护整定计算及其动作行为分析过程中投入与切除非零阻抗支路、节点合并与分

李秀卿,男,1954年生,硕士,副教授,主要研究方向为电力系统自动化。

曹国臣,男,1954年生,硕士,副教授,主要研究方向为电力系统继电保护与自动化。

## UNIFIED METHODS TO SIMULATE NETWORK CHANGES IN TOPOLOGY FOR POWER SYSTEM FAULT ANALYSIS

*Li Xiuqing, Cao Guochen* (Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 132012)

**Abstract** In this paper, two unified methods, network modification method and compensation method, are presented for simulating network changes in topology caused by addition and removal lines, breaker operations or both of them in power system fault analysis. The methods have the following characteristics:

- (1) Physical concept is clear.
- (2) The methods to simulate all kinds of network changes in topology are unified.
- (3) It is easy to write a program.

**Keywords** Power system Fault analysis Network changes in topology Simulation method