

# 继电保护整定计算中短路故障的分块算法

曹国臣 东北电力学院(132012) 刘亚奇 哈尔滨市电业局(150005)

**摘要** 本文提出了继电保护整定计算中短路故障的分块算法。这种方法不仅扩大了解题规模,而且能适应因电力系统运行方式变化和故障造成的子系统群拓扑结构的变化,避免了修改子系统群各序节点阻抗阵,因而整定计算速度快。经实例计算表明:文中算法正确。

**关键词** 继电保护 整定计算 短路分块算法

## 引言

在继电保护整定计算中,由于需要在电力系统各种运行方式下进行各种故障计算,一般都采用节点阻抗阵做为系统的数学模型<sup>[1]</sup>。因节点阻抗阵为满阵,常常使解题规模受到限制,特别是在PC机上尤为突出。扩大解题规模的最有效方法是分块法。本文将系统分块割切。网络拓扑结构变化统一处理成向子系统群注入的补偿电流,推导出无需修改子系统群各序节点阻抗阵,快速计算电力系统中互感或无互感线路非母线短路且一侧三相先跳开、非母线短路、母线短路所需的全部公式,并用算例证明了文中算法的正确性和有效性。

## 1 计算模型的建立

### 1.1 继电保护整定计算的分块模型

设将独立节点数为  $n$  的大型网络,分割成  $A, B, \dots, M$  个相互间无电磁联系的子系统,当不计联络线影响时,全网节点电压方程为:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ \vdots \\ V_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & & & \\ & Z_B & & \\ & & \ddots & \\ & & & Z_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ \vdots \\ I_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

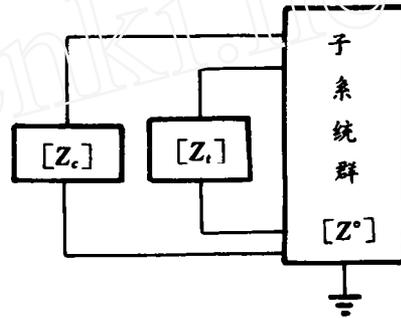


图1 电力系统的分块模型

简记为:

$$V = Z^{\circ} I \quad (2)$$

式中  $Z_A, Z_B, \dots, Z_M$  分别为各子系统的节点阻抗阵。

设子系统中,因元件切投、参数变化、互感线路挂检等造成的网络拓扑结构变化涉及到的支路为:  $p_k - q_k (k = 1, 2, \dots, m)$ 。

根据支路追加法,继电保护整定计算分块模型可用图1来描述。图中:  $Z_c$  是模拟子系统群网络结构及参数变化的等值链支,其取值由子系统群网络结构及参数变化的类型决定<sup>[2]</sup>;  $Z_i$  为子系统群间联络线组的支路阻抗阵,其取值情况与系统分割方法有关。本文中设:

收稿日期:1995—06—29

$$Z_t = \begin{bmatrix} Z_{s_1 t_2} & & 0 \\ & Z_{s_3 s_4} & \\ 0 & & \ddots \\ & & & Z_{s_{m-1} s_m} \end{bmatrix}$$

### 1.2 短路计算模型

设在图 1 所示网络中互感支路  $i-j$  上距  $i$  母线  $\alpha$  百分点处发生短路且  $i$  侧三相先跳开, 相应的等值网络见图 2。

在图 2 中,  $I^{(d)}$  为故障子系统群的注入电流列向量;  $p-q$  代表一组与  $i-j$  支路有互感的支路, 其分块支路导纳阵为:

$$\begin{bmatrix} I_{ij} \\ I_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ij-ij} & Y_{ij-pq} \\ Y_{pq-ij} & Y_{pq-pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ij} \\ V_{pq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

对正序、负序网或当  $i-j$  支路无零序互感时, 只需令  $Y_{ij-pq}, Y_{pq-ij}$  为零矩阵即可。

为避免计算中修改子系统群各序节点阻抗阵, 在图 2 中引入两条阻抗为  $-1.0\Omega$  的支路和一条阻抗为  $1.0\Omega$  的支路, 将图 2 等效变形成图 3。

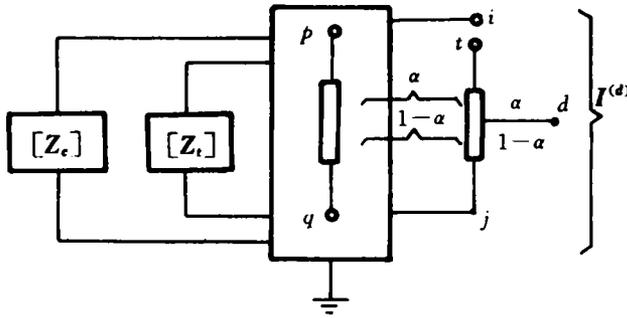


图 2 等值网络

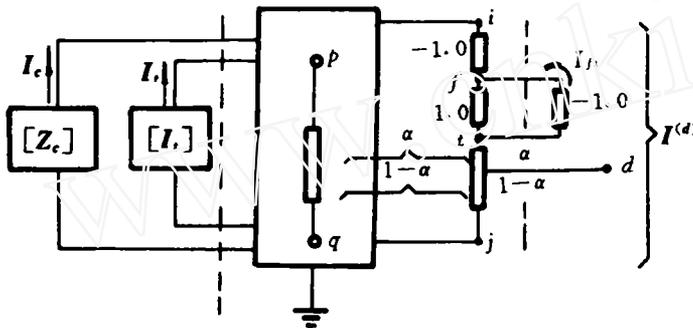


图 3 等值网络的变形

由图 3 可见, 为同时反映系统分块、子系统群拓扑结构变化及短路, 只需向原子系统群接入新的等值链支。

$$Z'_c = \begin{bmatrix} Z_c & 0 \\ 0 & -1.0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据补偿法, 将  $Z'_c$  对原子系统群的影响, 用在相应节点注入的补偿电流  $I'_c = [I_c \ I_t \ I_f]^T$  模拟后, 便建立起继电保护整定计算中短路故障的分块计算模型, 见图 4。

## 2 补偿电流的计算

根据欧姆定律, 由图 3, 等值链支  $Z'_c$  两端的电压为:

$$V'_c = -Z'_c I'_c$$

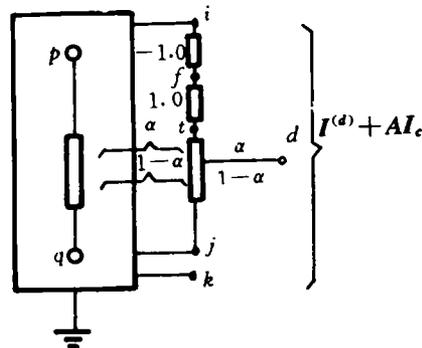


图 4 分块计算模型

根据迭加原理,由图 4:

$$\mathbf{V}_C' = \mathbf{A}^T \mathbf{Z} (\mathbf{I}^{(d)} + \mathbf{A} \mathbf{I}_C')$$

由上面两式,可解得补偿电流:

$$\mathbf{I}_C' = - [\mathbf{A}^T \mathbf{Z} \mathbf{A} + \mathbf{Z}_C']^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Z} \mathbf{I}^{(d)} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{A}$  为图 4 所示网络中注入有补偿电流的节点及故障点  $d$  与  $\mathbf{Z}_C'$  的关联矩阵;

$\mathbf{Z}$  为图 4 所示网络中注入有补偿电流的节点及故障点  $d$  构成的节点阻抗阵,即:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} p_1 & \cdots & q_m & s_1 & \cdots & s_m & f & t & d \\ P_1 & Z_{p_1 p_1} & & & & & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & & & & & & \\ q_m & Z_{q_m p_1} & \cdots & Z_{q_m q_m} & & & & & \\ S_1 & Z_{s_1 p_1} & \cdots & Z_{s_1 q_m} & Z_{s_1 s_1} & & & & \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & & & \\ S_m & Z_{s_m p_1} & \cdots & Z_{s_m q_m} & Z_{s_m s_1} & \cdots & Z_{s_m s_m} & & \\ f & Z_{f p_1} & \cdots & Z_{f q_m} & Z_{f s_1} & \cdots & Z_{f s_m} & Z_{ff} & \\ t & Z_{t p_1} & \cdots & Z_{t q_m} & Z_{t s_1} & \cdots & Z_{t s_m} & Z_{tf} & Z_{tt} \\ d & Z_{d p_1} & \cdots & Z_{d q_m} & Z_{d s_1} & \cdots & Z_{d s_m} & Z_{df} & Z_{dt} & Z_{dd} \end{bmatrix}$$

为一对称方阵。

根据节点阻抗参数的物理意义,由图 4 可见, $\mathbf{Z}$  阵中与原子系统节点  $p_1, q_1, \dots, p_m, q_m; s_1, \dots, s_m$  有关的元素等于  $\mathbf{Z}^0$  阵中相应的元素;与新增节点  $f, t, d$  有关的元素可由  $\mathbf{Z}^0$  阵中相应的元素求得:

$$Z_{fk} = \dot{V}_f^{(k)} = \dot{V}_i^{(k)} + I_{ij}^{(k)} = \dot{V}_i^{(k)} + Y_{ij-i} \dot{V}_{ij}^{(k)} + Y_{ij-p_i} \mathbf{V}_{p_i}^{(k)} \quad (k = p_1, \dots, q_m, s_1, \dots, s_m)$$

$$Z_{ik} = \dot{V}_k^{(i)} = \dot{V}_k^{(i)} \quad (k = p_1, \dots, q_m, s_1, \dots, s_m)$$

$$Z_{tt} = \dot{V}_t^{(t)} = \dot{V}_t^{(t)}$$

$$Z_{ft} = \dot{V}_t^{(f)} = \dot{V}_i^{(f)} + I_{ij}^{(f)} - 1.0 = \dot{V}_i^{(f)} + Y_{ij-i} \dot{V}_{ij}^{(f)} + Y_{ij-p_i} \mathbf{V}_{p_i}^{(f)} - 1.0$$

$$Z_{ff} = \dot{V}_f^{(f)} = \dot{V}_i^{(f)} + I_{ij}^{(f)} = \dot{V}_i^{(f)} + Y_{ij-i} \dot{V}_{ij}^{(f)} + Y_{ij-p_i} \mathbf{V}_{p_i}^{(f)}$$

$$Z_{dk} = \dot{V}_k^{(d)} = \alpha \dot{V}_j^{(k)} + (1 - \alpha) \dot{V}_i^{(k)} \quad (k = p_1, \dots, q_m, s_1, \dots, s_m)$$

$$Z_{df} = \dot{V}_f^{(d)} = \alpha \dot{V}_j^{(f)} + (1 - \alpha) \dot{V}_i^{(f)}$$

$$Z_{dt} = \dot{V}_t^{(d)} = \alpha \dot{V}_j^{(t)} + (1 - \alpha) \dot{V}_i^{(t)}$$

$$Z_{dd} = \dot{V}_d^{(d)} = \alpha \dot{V}_j^{(d)} + (1 - \alpha) \dot{V}_i^{(d)} + \alpha(1 - \alpha) Z_{ij-ij}$$

在上面和下面的公式中,未加说明的符号符合如下规定:

$\dot{V}_m^{(i)}$  为在图 4 中任意节点  $i$  注入正单位电流时,任意节点  $m$  的电压,即:  $\dot{V}_m^{(i)}$  等于子系统群原网节点阻抗阵或  $\mathbf{Z}$  阵中第  $i$  行第  $m$  列元素  $Z_{im}$ ;  $\dot{V}_m^{(ij)} = \dot{V}_m^{(i)} - \dot{V}_m^{(j)}$ ;  $\dot{V}_{p_i}^{(ij)} = \dot{V}_p^{(ij)} - \dot{V}_q^{(ij)}$ ;  $Z_{ij-ij}$  为任意支路  $i - j$  的支路阻抗。

### 3 任意节点电压的计算

3.1 设仅在故障点注入单位电流,即:

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

根据迭加原理,由图 4 可求得  $\mathbf{I}^{(d)}$  产生的任意节点电压:

$$\dot{V}_{k(r)}^{(d')} = \dot{V}_{k(r)}^{(d)} + \dot{V}_{k(r)}^{(f)} I_{f(r)} + \mathbf{V}_{k(r)}^c I_{c(r)} + \mathbf{V}_{k(r)}^l I_{l(r)} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (7)$$

式中  $\mathbf{V}_{k(r)}^c = [\dot{V}_{k(r)}^{(p,q)1}, \dot{V}_{k(r)}^{(p,q)2}, \dots, \dot{V}_{k(r)}^{(p,q)m}]$ ;

$\mathbf{V}_{k(r)}^l = [\dot{V}_{k(r)}^{(s)1}, \dot{V}_{k(r)}^{(s)2}, \dots, \dot{V}_{k(r)}^{(s)l-1, s}]$ ;

$I_{f(r)}, I_{c(r)}, I_{l(r)}$  可由式 5 求得。

### 3.2 故障点实际短路电流的计算

#### (1) 故障前故障点的开路电压

在工程计算中,一般认为短路前系统各节点电压标么值为 1.0,因此,短路前故障点的开路电压为 1.0。

#### (2) 从故障点看进去的各序阻抗

根据入端阻抗的物理意义:

$$Z_{d(r)} = \dot{V}_{d(r)}^{(d')} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (8)$$

式中  $\dot{V}_{d(r)}^{(d')}$  可由式 7 求得。

#### (3) 故障点的实际注入短路电流

##### a 三相短路

$$I_{d(1)} = -1/Z_{d(1)} \quad (9)$$

##### b 两相短路

$$I_{d(1)} = -I_{d(2)} = -1/(Z_{d(1)} + Z_{d(2)}) \quad (10)$$

##### c 单相接地短路

$$I_{d(1)} = I_{d(2)} = I_{d(0)} = -1/(Z_{d(1)} + Z_{d(2)} + Z_{d(0)}) \quad (11)$$

##### d 两相接地短路

$$I_{d(1)} = -1/(Z_{d(1)} + Z_{d(2)} // Z_{d(0)}) \quad (12)$$

$$I_{d(2)} = -I_{d(1)} Z_{d(0)} / (Z_{d(2)} + Z_{d(0)}) \quad (13)$$

$$I_{d(0)} = -(I_{d(1)} + I_{d(2)}) \quad (14)$$

### 3.3 任意节点的实际电压

对负序、零序网来讲,任意节点实际电压为:

$$\dot{V}_{k(r)}' = \dot{V}_{k(r)}^{(d')} I_{d(r)} \quad (r = 2, 0) \quad (15)$$

对正序网来讲,任意节点实际电压为:

$$\dot{V}'_{k(1)} = 1.0 + \dot{V}_{k(1)}^{(d')} I_{d(1)} \quad (16)$$

## 4 任意支路电流的计算

### 4.1 故障支路电流

根据基尔霍夫定律,由图 2:

$$I_{d_j(r)} = I_{d(r)} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (17)$$

### 4.2 非故障支路电流

#### (1) 正序、负序或零序无互感支路 $p-q$

$$I_{pq(r)} = \dot{V}'_{pq(r)} / Z_{pq-pq(r)} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (18)$$

#### (2) 故障所在零序互感组支路

由图 2,故障时互感支路电压方程增加一阶:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}'_{id(0)} \\ \dot{V}'_{pq(0)} \\ \dot{V}'_{dj(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha Z_{ij-ij(0)} & \alpha Z_{ij-pq(0)} & 0 \\ \alpha Z_{pq-ij(0)} & Z_{pq-pq(0)} & (1-\alpha)Z_{pq-ij(0)} \\ 0 & (1-\alpha)Z_{ij-pq(0)} & (1-\alpha)Z_{ij-ij(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{id(0)} \\ I_{pq(0)} \\ I_{dj(0)} \end{bmatrix}$$

式中  $I_{dj(0)} = I_{d(0)} + I_{id(0)}$ ;

$$\dot{V}'_{d(0)} = \alpha \dot{V}'_{j(0)} + (1-\alpha)\dot{V}'_{i(0)} + \alpha(1-\alpha)Z_{ij-ij(0)}I_{d(0)}$$

由上式解出互感支路电流:

$$\begin{bmatrix} I_{id(0)} \\ I_{pq(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ij-ij(0)} & Y_{ij-pq(0)} \\ Y_{pq-ij(0)} & Y_{pq-pq(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}'_{ij(0)} \\ \dot{V}'_{pq(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1-\alpha \\ 0 \end{bmatrix} I_{d(0)} \quad (19)$$

即:

$$I_{pq(0)} = Y_{pq-ij(0)}\dot{V}'_{ij(0)} + Y_{pq-pq}\dot{V}'_{pq(0)} \quad (20)$$

(3) 其它组零序互感支路

$$\begin{bmatrix} I_{lm(0)} \\ I_{st(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{lm-lm(0)} & Y_{lm-st(0)} \\ Y_{st-lm(0)} & Y_{st-st(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}'_{lm(0)} \\ \dot{V}'_{st(0)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

由图3可见,令  $I_{fr(r)} = 0$ ,即得到互感线路上距  $i$  母线  $\alpha$  百分点处短路时的计算模型,因而,只需在上面诸公式中,令  $I_{fr(r)} = 0$ ,就得到非母线短路时的计算公式;同理,令  $I_{fr(r)} = 0, \alpha = 0$  或 1,就得到母线短路时的计算公式。但是计算非母线短路时的故障支路电流和故障所在零序互感支路电流时,应改用式 19,即:

$$\begin{bmatrix} I_{id(r)} \\ I_{pq(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ij-ij(r)} & Y_{ij-pq(r)} \\ Y_{pq-ij(r)} & Y_{pq-pq(r)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}'_{ij(r)} \\ \dot{V}'_{pq(r)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1-\alpha \\ 0 \end{bmatrix} I_{d(r)} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (22)$$

$$I_{dj(r)} = I_{d(r)} + I_{id(r)} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (23)$$

## 5 算例

系统如图 5,其参数为  $S_b = 100\text{MVA}$  下的标么值,图中:分子上的数字为正序或负序电抗;分母上的数字为零序电抗。试计算当线路  $B-F$  切除后, $B-C$  线路上距  $B$  母线  $\alpha = 0.5$  处发生单相接地短路且  $B$  侧三相先跳开时,母线  $B, C$  的各序电压及故障线路  $B-C$  的各序电流。

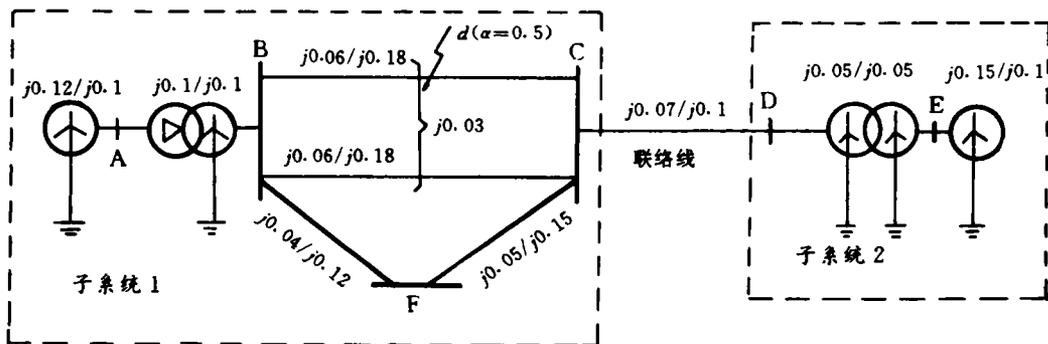


图 5 算例系统图

计算结果见表 1。计算中以  $C-D$  支路为联络线,将系统分割成两个子系统。

## 6 结论

(1) 本文系统地研究了继电保护整定计算中短路故障的分块算法, 扩大了解题规模, 并提高了整定计算速度。

(2) 本文算法结果精确、物理概念清晰, 具有互感与无互感线路处理方法统一、继电保护整定计算中各种故障计算公式统一、易于编制程序等特点。

表 1 算例计算结果

电气量	序分量	正序	负序	零序
补偿电流	$I_c$	- 0.736	- 0.736	- 0.625
	$I_f$	- 0.509	- 0.509	- 0.500
	$I_{f1}$	- j0.059	- j0.059	- j0.150
$I_d = 1.0$ 时的 B、C 母线电压	$V_{B(r)}^{(d')}$	j0.108	j0.108	j0.050
	$V_{C(r)}^{(d')}$	j0.137	j0.137	j0.125
故障点入端阻抗 $Z_{d(r)}$		j0.167	j0.167	j0.208
故障点注入短路电流 $I_{d(r)}$		j1.844	j1.844	j1.844
B、C 母线实际电压	$V'_{B(r)}$	0.801	- 0.199	- 0.092
	$V'_{C(r)}$	0.747	- 0.253	- 0.230
故障线路电流 $I_{d(r)}$		j1.844	j1.844	j1.844

### 参考文献

- 1 东北电力学院、东北电管局. 高压电网继电保护整定计算软件包. 1991 年
- 2 曹国臣. 零序电流保护整定计算的新算法. 继电器, 1995. 1

(上接 6 页)

(3) 为了线路单相跳闸, 电抗器非全相运行时, 零序功率方向保护不误动, 其电压取自母线侧时, 电流应取自电抗器首端, 且必须满足  $X_{oc} < X_{s0}$ 。如果电压取自线路侧, 则电流应取自中性点侧, 且应使  $X_{oc} < X_{DK}$ 。

对于电压取自母线侧且电流取自中性点侧, 或者电压取自线路侧且电流取自电抗器首端的情况, 则不管  $X_{oc}$  如何整定, 零序功率方向保护必在非全相运行时误动作, 这已为运行实践证明, 请各单位务必认真处理。

### 参考文献

- 1 沈建石、胡浩明. 电力自动化设备. 1982. 2
- 2 沈建石、夏俊. 电力自动化设备. 1986. 1