

# 继电保护整定计算中非全相振荡的分块算法

曹国臣 哈尔滨工业大学(150001) 张连斌 东北电力学院(132012)

**【摘要】** 基于分块理论和补偿法,建立起电力系统非全相振荡的分块计算模型。应用迭加原理并结合线性网络特性,提出了继电保护整定计算中非全相振荡的分块算法。这种方法在计算中无需修改子系统群各序节点阻抗阵,因而在计算速度和解题规模等方面均优于现有的计算方法。

**【关键词】** 继电保护 整定计算 非全相振荡 分块算法

## 引言

继电保护整定计算一般采用节点阻抗阵作为电力系统的数学模型,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。为扩大继电保护整定计算规模,文献<sup>[1]</sup>提出了继电保护整定计算中短路故障的分块算法,但是,在零序电流等保护的整定计算中还需进行非全相振荡计算。因此,有必要研究继电保护整定计算中非全相振荡的分块算法。

本文用补偿电流来模拟系统分块割切和因电力系统运行方式变化以及非全相断相造成的子系统群拓扑结构的变化,推导出无需修改子系统群各序节点阻抗阵,快速计算互感或无互感线路非全相振荡的分块算法,并用算例予以验证。

## 1 计算模型的建立

### 1.1 电力系统分块模型

设将独立节点数为 $n$ 的大型系统,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:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ \vdots \\ V_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A & & 0 \\ & Z_B & \\ & & \ddots \\ 0 & & & Z_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ \vdots \\ I_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

或:  $V = Z I$

式中  $Z_A, \dots, Z_M$  为各子系统的节点阻抗阵,其中的0元素是采用分块算法所节省的存储单元。

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

根据支路追加法,继电保护整定计算中电力系统的分块模型可用图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支路阻抗阵,其取值由网络结构及参数变化的类型决定<sup>[2]</sup>;  $Z_i$  是子系统群联络线组构成的支路阻抗阵,其取值情况与系统分割方法有关,本文中

设:

$$Z_t = \begin{bmatrix} Z_{t_1 t_2} & & & \\ & Z_{t_3 t_4} & 0 & \\ 0 & & \ddots & \\ & & & Z_{t_{m-1} t_m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 1.2 非全相振荡的计算模型

设在图 1 所示系统中互感支路  $i-j$  的  $i$  侧发生非对称断相造成振荡, 相应的各序等值网络如图 2 所示。图中:  $I^{(d)}$  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。对正序、负序网或  $i-j$  支路无零序互感时, 只需令  $Y_{ij-pq}$  为零矩阵即可。

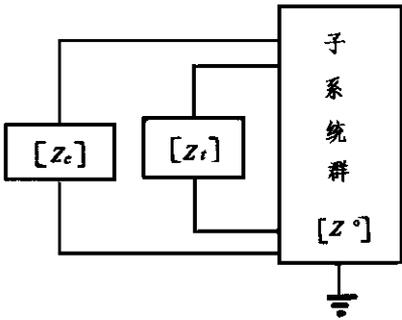


图 1 电力系统的分块模型

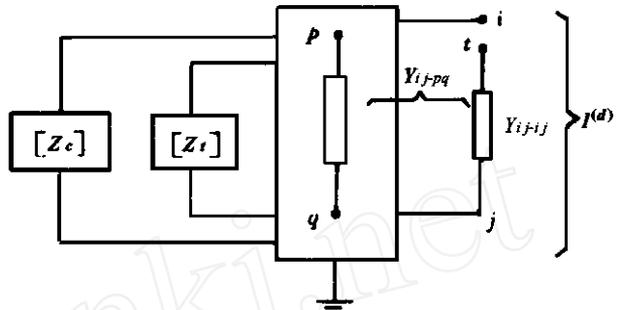


图 2 等值网络示意图

为将非对称断相用在相应节点注入的补偿电流来模拟, 将图 2 等效变成图 3, 图 3 中的节点  $f$  为模拟节点,  $1.0\Omega$  和两个  $-1.0\Omega$  的支路为虚拟支路。

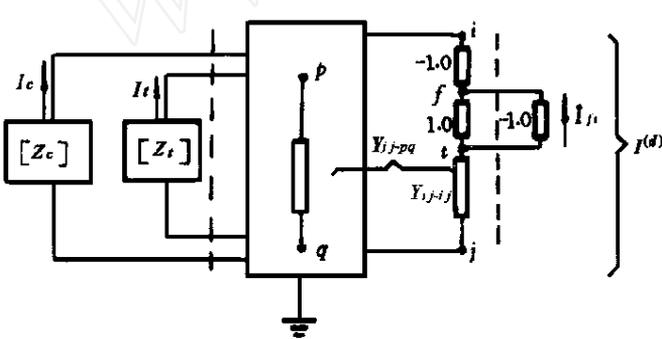


图 3 等值网络的变形

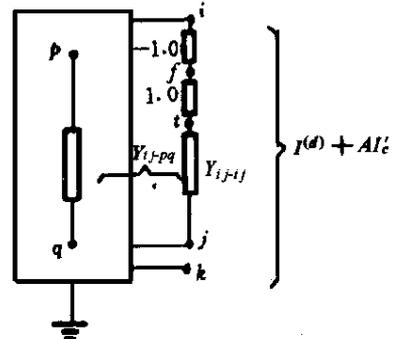


图 4 分块计算模型

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非对称断相故障, 只需向原子系统群接入新的等值链支  $Z_c$ :

$$Z_c = \begin{bmatrix} Z_c & & 0 \\ & Z_t & \\ 0 & -1.0 & \end{bmatrix} \quad (3)$$

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:

$$I_c = [I_c \ I_t \ I_{ft}]^T \quad (4)$$

模拟后, 便建立起继电保护整定计算中非全相振荡的分块计算模型, 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:

$$V_c = - Z_c I_c$$

根据迭加原理由图 4:

$$V_c = A^T Z (I^{(d)} + A I_c)$$

将上面两式联立, 消去  $V_c$ , 可解得补偿电流:

$$I_c = - [A^T Z A + Z_c]^{-1} A^T Z I^{(d)} \quad (5)$$

式中  $A$  为图 4 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 4 所示网络中注入有补偿电流的节点构成的节点阻抗阵, 即:

$$Z = \begin{matrix} & \begin{matrix} p_1 & \dots & q_s & t_1 & \dots & t_m & f & t \end{matrix} \\ \begin{matrix} p_1 \\ \vdots \\ q_s \\ t_1 \\ \vdots \\ t_m \\ f \\ t \end{matrix} & \begin{bmatrix} Z_{p_1 p_1} & & & & & & & \\ \vdots & \ddots & & & & & & \\ Z_{q_s p_1} & \dots & Z_{q_s q_s} & & & & & \\ Z_{t_1 p_1} & & Z_{t_1 q_s} & Z_{t_1 t_1} & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & & & \\ Z_{t_m p_1} & \dots & Z_{t_m q_s} & Z_{t_m t_1} & \dots & Z_{t_m t_m} & & \\ Z_{f p_1} & \dots & Z_{f q_s} & Z_{f t_1} & \dots & Z_{f t_m} & Z_{f f} & \\ Z_{t p_1} & \dots & Z_{t q_s} & Z_{t t_1} & \dots & Z_{t t_m} & Z_{t f} & Z_{t t} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

为对称方阵。

根据节点阻抗参数的物理意义, 由图 4 可见,  $Z$  阵中与原子系统节点  $p_1, q_1, \dots, p_s, q_s, \dots, t_1, \dots, t_m$  有关的元素等于  $Z$  阵中相应的元素; 与新增节点  $f, t$  有关的元素可由  $Z$  阵中相应元素求得:

$$Z_{fk} = V_f^{(k)} = V_k^{(i)} + Y_{ij-ij} V_{ij}^{(k)} + Y_{ij-pq} V_{pq}^{(k)} \quad (k = p_1, \dots, q_s, t_1, \dots, t_m)$$

$$Z_{ik} = V_k^{(i)} = V_k^{(i)} \quad (k = p_1, \dots, q_s, t_1, \dots, t_m)$$

$$Z_{ff} = V_f^{(f)} = V_f^{(i)} + Y_{ij-ij} V_{ij}^{(f)} + Y_{ij-pq} V_{pq}^{(f)} - 1.0$$

$$Z_{ff} = V_f^{(f)} = V_f^{(i)} + Y_{ij-ij} V_{ij}^{(f)} + Y_{ij-pq} V_{pq}^{(f)}$$

在上面和下面的公式中, 未加说明的符号含义如下:

$V_m^{(i)}$  为仅在图 4 中任意节点  $i$  加入正单位电流时, 任意节点  $m$  的电压, 即:  $V_m^{(i)}$  等于原子系统群节点阻抗阵或  $Z$  阵中第  $i$  行第  $m$  列元素  $Z_{im}$ ;  $V_m^{(ij)} = V_m^{(i)} - V_m^{(j)}$ ;  $V_{pq}^{(ij)} = V_p^{(ij)} - V_q^{(ij)}$ ;  $Z_{ij-ij}$  为任意支路  $i-j$  的支路阻抗。

## 3 任意节点电压的计算

3.1 设断相口电流  $I_{it(r)} = 1.0$ , 即:

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

根据迭加原理, 由图 4 可求得  $I_{it(r)}$  产生的任意节点电压:

$$V_k^{(i)(r)} = V_k^{(i)(i)} + V_k^{(f)(i)} I_{f t(r)}^{(i)} + V_k^{(c)(r)} I_{c(r)} + V_k^{(t)(r)} I_{t(r)} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (7)$$

式中  $V_k^{(i)(r)} = V_{it(r)}^{(k)} = 0$ ;

$$V_{k(r)}^{\circ(f)} = V_{f t(r)}^{\circ(k)} = V_{f(r)}^{\circ(k)} - V_{t(r)}^{\circ(k)};$$

$$V_{k(r)}^c = [V_{k(r)}^{\circ(p_1 q_1)}, V_{k(r)}^{\circ(p_2 q_2)}, \dots, V_{k(r)}^{\circ(p_s q_s)}];$$

$$V_{k(r)}^t = [V_{k(r)}^{\circ(t_1^1)}, V_{k(r)}^{\circ(t_2^2)}, \dots, V_{k(r)}^{\circ(t_{1^m}^m)}];$$

$I_{f t(r)}$ 、 $I_{c(r)}$ 、 $I_{t(r)}$  可由式 5 求得:

### 3.2 断相口实际电流的计算

#### (1) 正序网断相口 $i, t$ 的开路电压

设变结构子系统群中  $1, 2, \dots, s$  号母线为发电机母线,  $E_m$ 、 $Z_{m(1)}$  为第  $m$  台发电机的电势和正序等值阻抗, 根据迭加原理, 正序网断相口的开路电压为:

$$V_{it(1)}^{\circ} = \sum_{m=1}^s V_{it(1)}^{\circ(m)} \frac{E_m}{Z_{m(1)}} \quad (8)$$

式中  $V_{it(1)}^{\circ(m)} = V_{m(1)}^{\circ(i)}$  可由式 7 求得.

#### (2) 从断相口看进去的入端阻抗

根据入端阻抗的物理意义,

$$Z_{it(r)} = V_{it(r)}^{\circ(i)} \quad (r = 0, 1, 2)$$

将式 7 代入上式:

$$Z_{it(r)} = V_{it(r)}^{\circ(i)} + V_{it(r)}^{\circ(f)} I_{f t(r)}^{\circ} + V_{it(1)}^c I_{c(r)} + V_{it(r)}^t I_{t(r)} \quad (r = 0, 1, 2)$$

式中  $V_{it(r)}^{\circ(i)} = 0$ ;  $V_{it(r)}^{\circ(f)} = I_{f t(r)}^{\circ(i)} = 1$ ;  $0$ ;

$$V_{it(r)}^c = [V_{it(r)}^{\circ(p_1 q_1)}, \dots, V_{it(r)}^{\circ(p_s q_s)}] = [0, \dots, 0];$$

$$V_{it(r)}^t = [V_{it(r)}^{\circ(t_1^1)}, \dots, V_{it(r)}^{\circ(t_r^r)}] = [0, \dots, 0].$$

整理后:

$$Z_{it(r)} = I_{f t(r)}^{\circ} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (9)$$

#### (3) 断相口的实际注入电流

##### a 单相断线

$$I_{it(1)}^{\circ} = - V_{it(1)}^{\circ} / (Z_{it(1)} + Z_{it(2)} + Z_{it(0)}) \quad (10)$$

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

$$I_{it(0)}^{\circ} = - (I_{it(1)}^{\circ} + I_{it(2)}^{\circ}) \quad (12)$$

##### b 两相断线

$$I_{it(1)}^{\circ} = I_{it(2)}^{\circ} = I_{it(0)}^{\circ} = - V_{it(1)}^{\circ} / (Z_{it(1)} + Z_{it(2)} + Z_{it(0)}) \quad (13)$$

### 3.3 任意节点的实际电压

根据线性网络特性:

$$V_{k(r)}^{\circ} = V_{k(r)}^{\circ(i)} I_{it(r)}^{\circ} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (14)$$

对正序网来讲, 由式 14 求出的电压  $V_{k(r)}^{\circ}$  仅为正序电压的故障分量  $\Delta V_{k(1)}$ , 正序网节点实际电压应为故障前节点  $k$  的电压  $V_{k(1)}^{\circ[0]}$  与  $\Delta V_{k(1)}$  之和, 即:

$$V_{k(1)}^{\circ} = V_{k(1)}^{\circ[0]} + \Delta V_{k(1)} \quad (15)$$

式中  $V_{k(1)}^{\circ[0]}$  可由迭加原理求得:

$$V_{k(1)}^{\circ[0]} = \sum_{m=1}^s V_{k(1)}^{\circ(m)} \frac{E_m}{Z_m} \quad (16)$$

式中  $V_{k(1)}^{\circ(m)}$  可由图 4 求得:

$$V_{k(1)}^{\circ(m)} = V_{m(1)}^{\circ(k)} = V_{m(1)}^{\circ(k)} + V_{m(1)}^{\circ(f)} I_{f t(1)} + V_{m(1)}^c I_{c(1)} + V_{m(1)}^t I_{t(1)} \quad (17)$$

补偿电流  $I_{f t(1)}$ 、 $I_{c(1)}$ 、 $I_{t(1)}$  可由式 5 求得, 由式 17 可见, 在式 5 中应令:

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

## 5 任意支路电流的计算

### 5.1 故障支路电流

由图 2:

$$\dot{I}_{ij}^{(r)} = - \dot{I}_{ii}^{(r)} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (18)$$

### 5.2 非故障支路电流

(1) 正序、负序或零序无互感支路

$$\dot{I}_{pq}^{(r)} = \dot{V}_{pq}^{(r)} / Z_{pq-pq}^{(r)} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (19)$$

(2) 故障所在零序互感组支路

由图 3 写出故障所在互感支路组的电流方程, 将式 18 代入该方程并消去电压  $\dot{V}_{ij}^{(0)}$  可求得:

$$I_{pq}^{(0)} = (Y_{pq-pq}^{(0)} - \frac{Y_{pq-ij}^{(0)} Y_{ij-pq}^{(0)}}{Y_{ij-ij}^{(0)}}) V_{pq}^{(0)} - Y_{pq-ij}^{(0)} \frac{\dot{I}_{ii}^{(0)}}{Y_{ij-ij}^{(0)}} \quad (20)$$

(3) 其它零序互感组支路

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

## 6 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, P 处发生 A、B 两相断线故障时, 母线 B、C 的电压和通过故障线路 B - C 的电流。

以 C - D 支路为联络线, 将系统分割成两个子系统, 相应的计算结果见表 1。

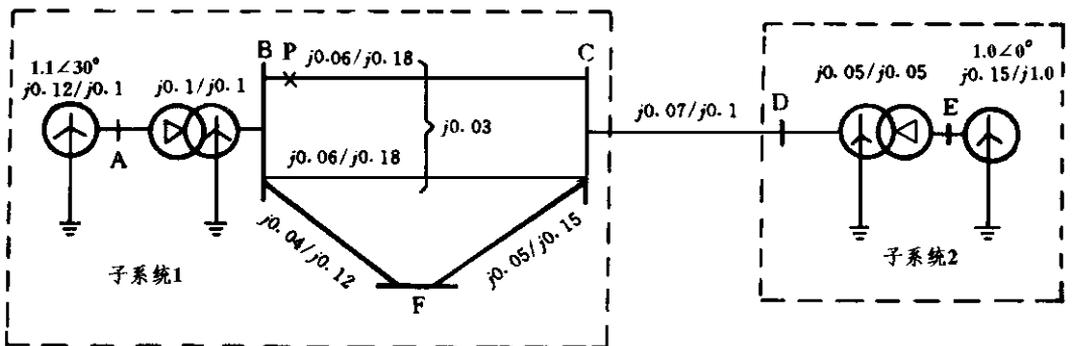


图 5 算例系统接线图

## 6 结论

(1) 本文系统地研究了继电保护整定计算中非全相振荡的分块算法, 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, 具有互感与无互感支路处理方法统一、易于程序实现等优点。

表 1 算例计算结果

电气量		序分量	正序	负序	零序
补偿电流	$I_c$		1.336	1.336	0.825
	$I_t$		0.109	0.109	0.283
	$I_{ft}$		$j0.113$	$j0.113$	$j0.258$
$I_{it} = 1.0$ 时的 B、C 母线电压	$V_B^{(id)}$		$j0.024$	$j0.024$	$j0.028$
	$V_C^{(id)}$		$-j0.029$	$-j0.029$	$-j0.071$
断相口开路电压 $V_{it}^0$			0.06 94.923	0	0
断相口入端阻抗 $Z_{it}$			$j0.113$	$j0.113$	$j0.258$
断相口实际注入电流 $I_{it}$			0.124 184.923	0.124 184.923	0.124 184.923
B、C 母线实际电压	$V_B$		1.025 18.598	0.003 274.923	0.004 274.923
	$V_C$		1.014 15.656	0.004 94.923	0.009 94.923
故障线路电流 $I_{ic}$			0.124 4.923	0.124 4.923	0.124 4.923

## 参考文献

- 1 曹国臣等. 继电保护整定计算中短路故障的分块算法. 继电器, 1995. 4
- 2 曹国臣. 零序电流保护整定计算的新算法. 继电器, 1995. 1

(上接第 8 页) 下电压明显不同, 永久故障时其电压约为 0。对于两相短路接地, 永久故障时故障相电压约为 0, 瞬时故障时其值与理论计算值相符。对于三相短路接地, 永久故障时的各相电压均较小, 而瞬时故障时重合相电压近似为电源电压, 其余两相电压值与理论计算值相符。对于两相短路, 当两故障相中的一相时, 二者的电压值之比在永久故障与瞬时故障时差别较大。而当重合非故障相时, 二者基本相等。对于三相不接地短路, 二种情况下的电压则明显不同。

由表 3 及附录波形可知, 仿真结果与理论分析是一致的。

## 5 结论

1) 本文对无并联电抗器补偿的线路三相跳闸后的自适应分相重合原理及重合逻辑进行了研究, 并根据线路一端一相合闸后线路侧的电压状态, 提出了自适应分相重合闸的实用判据。

2) 理论分析和仿真结果表明, 文中提出的自适应分相重合闸判据简单可靠, 能正确在线预测出瞬时性故障与永久性故障, 使重合闸装置根据不同的线路状况及故障类型决定相应的对策, 解决了盲目合闸的问题。

## 参考文献

- 1 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障与永久故障的方法. 西安交通大学报, VO1 18, NO. 2, Apr 1984
- 2 葛耀中, 肖原. 超高压输电线自适应三相自动重合闸. 电力自动化设备, 1995. 2
- 3 A. G. PHADKE, S. H. HORWITZ, A. G. MCCABE. 自适应自动重合闸. 国际大电网 1990 年会议论文集