

# 零序电流保护整定计算的新算法

曹国臣 东北电力学院电力系(132012)

**摘要** 本文基于补偿原理,建立起零序电流保护整定计算新模型,根据迭加原理和互易定理,提出了一种不修改原网各序节点阻抗阵快速整定计算零序电流保护的新方法。经实例计算表明,文中算法整定计算速度快、结果精确。

**关键词** 零序电流保护 补偿原理 整定计算

## 引言

零序电流保护构成简单、切除故障机率高,是高压电网接地故障的主要保护,但由于这种保护受电力系统运行方式变化影响较大,要取得合理的定值,必须对系统可能出现的各种运行方式进行非全相振荡和短路故障的计算。

零序电流保护整定计算的现有方法<sup>[1]</sup>,因不能适应因元件切除或投入、互感线路挂检等造成的系统运行方式变化,在整定计算中必须修改原网各序节点阻抗阵,计算量较大,特别是对含有零序互感的大型电力系统这一问题更加突出。

本文应用补偿原理将系统运行方式变化,用在原网(系统运行方式变化前的网络)相应节点注入的补偿电流来模拟,将文献<sup>[2-3]</sup>提出的变结构与参数电力系统非对称断相和短路故障的计算模型统一起来,建立起零序电流保护整定计算模型;根据迭加原理和互易定理,推导出不修改原网各序节点阻抗阵快速整定计算零序电流保护的新方法,并用实例予以验证。

## 1 整定计算模型的建立

设系统运行方式变化涉及到的  $m$  条支路为,  $S_K-t_K(K=1,2,\dots,m)$ 。根据支路追加法,零序电流保护整定计算中涉及到的系统运行方式变化,可等效成向原网追加  $m$  条等值链支  $Z_c$ ,其取值情况见表 1。

表 1  $Z_c$  的取值情况

系统运行方式变化的类型	$Z_c$	备注
追加或切除支路阻抗为 $Z_m$ 的 $m$ 条无互感或整组互感链支	$\pm Z_m$	“+”号为追加 “-”号为切除
从支路阻抗为 $Z_m$ 的整组互感支路中切除 $m$ 条支路	$[Z_r^{-1} - Z_m^{-1}]^{-1}$ 或: $\begin{bmatrix} -Z_m & 0 \\ 0 & Z_r \end{bmatrix}$	$Z_r$ 为切除 $m$ 条支路后的剩余支路阻抗
支路阻抗为 $Z_m$ 的整组互感支路中,出现的 $m$ 条支路两端断开并接地(挂检)	$[Z_n^{-1} - Z_m^{-1}]^{-1}$ 或: $\begin{bmatrix} -Z_m & 0 \\ 0 & Z_n \end{bmatrix}$ 式中: $Z_n = Z_{nn} - Z_{ng} Z_{gg}^{-1} Z_{gn}$	$Z_{nn}$ 为非停电检修支路阻抗; $Z_{gg}$ 为停电检修支路阻抗; $Z_{ng} = Z_{gn}$ 为停电检修支路间的互阻抗

现在设在这个变运行方式系统中,互感线路*i-j*的*i*侧发生非对称断相故障或互感线路*i*

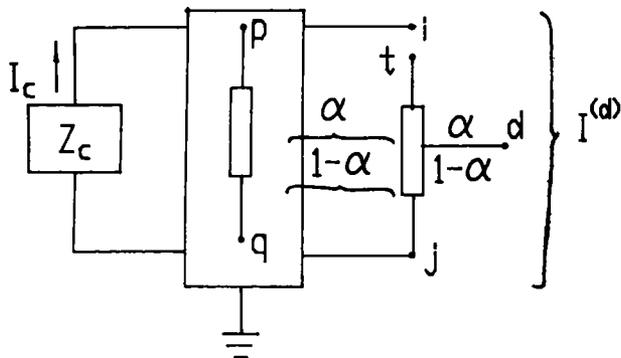


图1 等值网络示意图

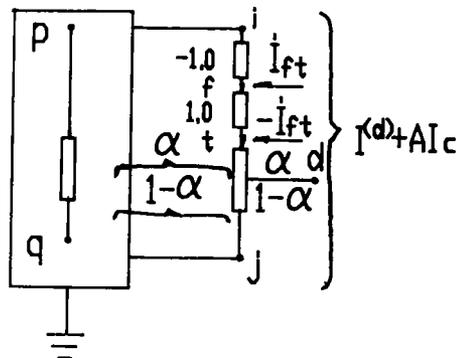


图2 整定计算模型

*i-j*上距*i*母线 $\alpha$ 百分点处发生短路故障且*i*侧三相先跳开(相继动作),相应的各序等值网络见图1。图中: $I^{(d)}$ 为故障网络的注入电流列向量,*p-q*代表一组与*i-j*支路有互感的支路,其正常运行时的分块支路导纳阵为:

$$\begin{bmatrix} I_{ij} \\ I_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ij-ij} & Y_{ij-pq} \\ Y_{pq-ij} & Y_{pq-pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ij} \\ V_{pq} \end{bmatrix}$$

为恢复因断相或三相断开造成的网络拓扑结构变化,将图1等效变成图2,首先在图1中的*i*点接入 $-1.0\Omega$ 的电阻,相应的新节点称为*f*,然后在*f*和*t*节点之间加入两条阻抗分别为 $1.0\Omega$ 和 $-1.0\Omega$ 的并联支路,通过 $-1.0\Omega$ 支路的电流称为 $I_{ft}$ 。根据补偿原理将 $Z_c$ 和 $-1.0\Omega$ 支路对原网的影响用补偿电流 $I_c$ 和 $I_{ft}$ 模拟后,便建立起零序电流保护整定计算模型图2。

## 2 非全相振荡时任意母线零序电压的计算

在图2中,令 $I^{(d)} = [0, \dots, 0, \overset{i}{I_{ft}}, 0, \dots, 0, \overset{t}{-I_{ft}}, 0, \dots, 0]^T$ 。即得到*i-j*支路*i*侧非全相运行时的网络模型。

### 2.1 单位振荡电流产生的任意母线零序电压

设断相口振荡电流 $I_{ft} = 1.0$ ,根据迭加原理,由图2可求得 $I_{ft} = 1.0$ 时的任意母线零序电压:

$$\dot{V}_K^{(0)'} = \dot{V}_K^{(0)} + \dot{V}_K^{(0)} I_{ft} + V_k I_c \quad (1)$$

$$\text{式中 } \dot{V}_K^{(0)} = \dot{V}_K^{(k)} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{V}_K^{(0)'} = \dot{V}_K^{(k)} = \dot{I}_{ft}^{(k)} = \dot{I}_{ij}^{(k)} = Y_{ij-ij} \dot{V}_{ij}^{(k)} + Y_{ij-pq} \dot{V}_{pq}^{(k)} \quad (3)$$

$$V_k = [\dot{V}_k^{(s_1 t_1)}, \dot{V}_k^{(s_2 t_2)}, \dots, \dot{V}_k^{(s_m t_m)}] \quad (4)$$

根据欧姆定律和迭加原理可求得补偿电流

$$[I_c I_{ft}]^T = -[A^T Z A + Z_c']^{-1} A^T Z I^{(d)} \quad (5)$$

式中  $A$  为图2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2所示网络中注入有补偿电流的节点构成的节点阻抗阵,即:

$$Z = \begin{bmatrix} s_1 & \cdots & t_m & f & t \\ Z_{s_1 s_1} & & & & \\ \vdots & \ddots & & & \\ Z_{t_m s_1} & \cdots & Z_{t_m t_m} & & \\ f & Z_{fs_1} & \cdots & Z_{ftm} & Z_{ftf} \\ t & Z_{ts_1} & \cdots & Z_{ttm} & Z_{tft} & Z_{ttt} \end{bmatrix}$$

为一对称方阵;  $Z_c' = \begin{bmatrix} Z_c & 0 \\ 0 & -1.0 \end{bmatrix}$

根据节点阻抗参数的物理意义,由图 2 可见,Z 阵中与原网节点  $s_1, t_1, \dots, s_m, t_m$  有关的元素等于原网节点阻抗阵中的相应元素;与新增节点 f、t 有关的元素可由原网节点阻抗阵元素求得:

$$Z_{fk} = \dot{V}_f^{(k)} = \dot{V}_k^{(i)} + Y_{ij-ij} \dot{V}_{ij}^{(k)} + Y_{ij-Pq} \dot{V}_{Pq}^{(k)} \quad (k = s_1, t_1, \dots, s_m, t_m)$$

$$Z_{tk} = \dot{V}_t^{(k)} = \dot{V}_k^{(i)} \quad (k = s_1, t_1, \dots, s_m, t_m)$$

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

$$Z_{tf} = \dot{V}_t^{(f)} = \dot{V}_f^{(i)} + Y_{ij-ij} \dot{V}_{ij}^{(f)} + Y_{ij-Pq} \dot{V}_{Pq}^{(f)} - 1.0$$

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

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 2 中任意节点 i 加入正单位电流时,任意节点 m 的电压,即:  $\dot{V}_m^{(i)}$  等于原网节点阻抗阵或 Z 阵中第 i 行第 m 列元素  $Z_{im}$ ;  $\dot{V}_m^{(f)} = \dot{V}_m^{(i)} - \dot{V}_m^{(f)}$ ;  $\dot{V}_{Pq}^{(f)} = \dot{V}_p^{(i)} - \dot{V}_q^{(f)}$ ;  $Z_{ij-ij}$  为任意支路 i-j 的支路阻抗。

## 2.2 断相口实际零序电流的计算

### (1) 正序网中断相口 i、t 的开路电压

设变运行方式系统中 1, 2...s 号母线为发电机母线,  $\dot{E}_m, Z_m$  分别为第 m 台发电机的电势和等值阻抗。

根据迭加原理,由图 3 可求得断相口的开路电压。

$$\dot{E}_{it} = \sum_{m=1}^s \dot{V}_{it}^{(m)'} \frac{\dot{E}_m}{Z_m} \quad (6)$$

式中  $\dot{V}_{it}^{(m)'} = \dot{V}_m^{(i)'}$  可由 1 式求得。

### (2) 从断相口看进去的各序入端阻抗

根据入端阻抗的物理意义:

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

将 1 式代入上式:

$$Z_{ii(r)} = \dot{V}_{ii(r)}^{(i)} + \dot{V}_{ii(r)}^{(f)} \dot{I}_{ft(r)} + \dot{V}_{ii(r)}^{(t)} \dot{I}_{tt(r)}$$

式中  $\dot{V}_{ii(r)}^{(i)} = 0, \dot{V}_{ii(r)}^{(f)} = \dot{V}_{ii(r)}^{(t)} = 1.0$ ;

$$\dot{V}_{ii(r)} = [\dot{V}_{ii(r)}^{(s1t1)}, \dots, \dot{V}_{ii(r)}^{(smtm)}] = [0, \dots, 0]$$

整理后:

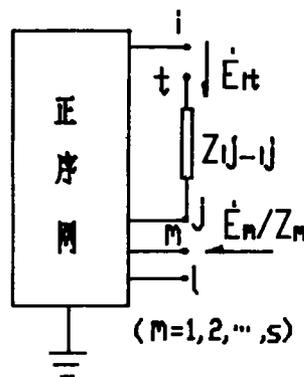


图 3 断相口开路时的正序等值网络

$$Z_{it(r)} = I_{it(r)} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (7)$$

(3) 断相口实际注入的零序电流

a. 单相断线

$$I_{it} = \frac{E_{it}}{Z_{it(1)} + Z_{it(0)} + \frac{Z_{it(1)}Z_{it(0)}}{Z_{it(2)}}} \quad (8)$$

b. 两相断线

$$I_{it} = \frac{-E_{it}}{Z_{it(1)} + Z_{it(2)} + Z_{it(0)}} \quad (9)$$

2.3 任意母线的实际零序电压

$$V_{S'} = V_k^{(0')} I_{it} \quad (10)$$

### 3 母线侧或非母线故障又发生相继动作的计算

在图 2 中, 令  $I^{(d)} = [0, \dots, 0, I_d, 0, \dots, 0]^T$ , 即得到  $i - j$  支路母线侧或非母线故障又发生相继动作时的网络模型。

3.1 单位短路电流产生的任意母线零序电压

设故障点注入电流  $I_d = 1.0$ 。根据迭加原理, 由图 2 可求得相应的任意母线零序电压:

$$V_k^{(d')} = \dot{V}_k^{(d)} + V_k^{(0')} I_{it} + V_k I_c \quad (11)$$

式中  $\dot{V}_k^{(d)} = \alpha \dot{V}_j^{(k)} + (1 - \alpha) \dot{V}_i^{(k)}$ ;

$\dot{V}_k^{(0)}$  和  $V_k$  可分别由 3 式和 4 式求得。

补偿电流可根据欧姆定律和迭加原理求得:

$$[I_c I_{it}]^T = -[A^T Z A + Z_c']^{-1} A^T Z I^{(d)} \quad (12)$$

式中  $A$  为图 2 所示网络中注入有补偿电流的节点及故障  $d$  与  $Z'$  的关联矩阵;

$Z$  为图 2 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, 比 5 式中的  $Z$  阵增加一行一列, 即:

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

为对称方阵。 $Z$  阵中与新增节点  $d$  有关的元素可由原网节点阻抗阵元素求得:

$$\begin{aligned} Z_{dk} &= \dot{V}_k^{(d)} = \alpha \dot{V}_j^{(k)} + (1 - \alpha) \dot{V}_i^{(k)} \quad (k = s_1, t_1, \dots, s_m, t_m, f, t) \\ Z_{dd} &= \dot{V}_d^{(d)} = \alpha \dot{V}_j^{(d)} + (1 - \alpha) \dot{V}_i^{(d)} + \alpha(1 - \alpha) Z_{ij-ij} \end{aligned} \quad (13)$$

3.2 故障点实际零序电流的计算

(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植为 1.0,因此,短路故障前故障点的开路电压为 1.0。

(2) 从故障点看进去的各序入端阻抗

根据入端阻抗的物理意义:

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

将 11 式代入上式:

$$Z_{d(r)} = \dot{V}_{d(r)}^{(d)} + \dot{V}_{d(r)}^{(f)} \dot{I}_{f(r)} + V_{d(r)} \dot{I}_{c(r)} \quad (r = 0, 1, 2) \quad (14)$$

式中  $\dot{V}_{d(r)}^{(d)} = Z_{dd(r)}, \dot{V}_{d(r)}^{(f)} = Z_{df(r)} - Z_{dr(r)}$ ;

$$\begin{aligned} V_{d(r)} &= [\dot{V}_{d(r)}^{(s1t1)}, \dots, \dot{V}_{d(r)}^{(s_m t_m)}] \\ &= [Z_{ds1(r)} - Z_{dt1(r)}, \dots, Z_{dsm(r)} - Z_{dtm(r)}]; \end{aligned}$$

$I_c$  和  $\dot{I}_{f(r)}$  可由 12 式求得。

(3) 故障点实际注入的零序电流

a 单相接地短路

$$\dot{I}_d = \frac{-1}{Z_{d(1)} + Z_{d(2)} + Z_{d(0)}} \quad (15)$$

b 两相接地短路

$$\dot{I}_d = \frac{1}{Z_{d(1)} + Z_{d(0)} + \frac{Z_{d(1)} Z_{d(0)}}{Z_{d(2)}}} \quad (16)$$

3.3 任意母线的实际零序电压

$$\dot{V}_k' = \dot{V}_k^{(d)} \dot{I}_d \quad (17)$$

## 4 母线或非母线故障的计算

d

在图 2 中,令  $I^{(d)} = [0, \dots, 0, I_d, 0, \dots, 0]^T, \dot{I}_{f(r)} = 0$ ,即得到  $i-j$  支路上距  $i$  母线  $\alpha$  百分点处发生短路故障时的网络模型,因此,只需在 11 ~ 17 式中,令  $\dot{I}_{f(r)} = 0$ ,就得到非母线短路故障的计算公式;同理,令  $\dot{I}_{f(r)} = 0, \alpha = 0$  或 1,就得到母线短路故障的计算公式。

## 5 任意支路零序电流的计算

5.1 故障支路零序电流

(1) 非全相振荡

由图 1:

$$\dot{I}_{ij} = -\dot{I}_i \quad (18)$$

(2) 非母线短路且  $i$  侧先跳开

由图 1:

$$\dot{I}_{dj} = \dot{I}_d \quad (19)$$

(3) 非母线短路

由图 2:

$$\dot{I}_{dj} = \dot{I}_d + \dot{I}_{id} \quad (20)$$

式中  $I_{id}$  可由下面 6.2 节中 24 式求得。

## 5.2 非故障支路零序电流

### (1) 零序无互感支路 p - q

$$I_{pq} = \frac{V_{pq}}{Z_{pq-pq}} \quad (21)$$

### (2) 故障所在零序互感组支路

#### a 非全相振荡

由图 1, 将 18 式代入互感支路电流方程, 并消去  $V_{ij}$  可求得:

$$I_{pq} = (Y_{pq-pq} - \frac{Y_{pq-ij}Y_{ij-pq}}{Y_{ij-ij}})V_{pq}' - Y_{pq-ij} \frac{I_{it}}{Y_{ij-ij}} \quad (22)$$

#### b 非母线短路且 i 侧先跳开

由图 1, 将 20 式和 13 式代入互感支路电流方程, 可解得:

$$I_{pq} = Y_{pq-ij}V_{ij}' + Y_{pq-pq}V_{pq}' \quad (23)$$

#### c 非母线短路

由图 2, 将 20 式和 13 式代入互感支路电压方程, 可解得互感支路电流:

$$\begin{bmatrix} I_{id} \\ I_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ij-ij} & Y_{ij-pq} \\ Y_{pq-ij} & Y_{pq-pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ij}' \\ V_{pq}' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 - \alpha \\ 0 \end{bmatrix} I_d \quad (24)$$

## 5.3 其它组零序互感支路

$$\begin{bmatrix} I_{lm} \\ I_{st} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{lm-lm} & Y_{lm-st} \\ Y_{st-lm} & Y_{st-st} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{lm}' \\ V_{st}' \end{bmatrix} \quad (25)$$

## 6 算法校核

按文中算法对东北网部分地区进行了实算, 经与东北等网局所使用的零序电流保护整定计算实用程序<sup>[1]</sup>相比较, 证明文中算法正确。

## 7 结论

本文将补偿原理应用于零序电流保护整定计算之中, 建立起变运行方式电力系统非全相振荡和短路故障的通用计算模型; 在不修改原网各序节点阻抗阵的条件下, 根据迭加原理和互易定理, 推导出零序电流保护整定计算所需的全部公式。

本文算法的特点是: 物理概念清晰、互感和无互感线路计算公式统一、计算过程简明、计算量小、结果精确、易于程序实现。

### 参考文献

- 1 东北电力学院、东北电管局. 零序电流保护整定计算实用程序. 1986 年
- 2 曹国臣等. 变结构与参数电力系统中互感线路非对称断相故障的快速计算. 电力系统自动化, 1993. 6
- 3 曹国臣. 变结构与参数电力系统中互感线路短路故障的快速计算. 电力系统自动化 1993. 11