

快速计算电力系统双重故障的口网络法

曹国臣 东北电力学院(132012)

摘要 本文在既不形成故障系统各序节点导纳(或阻抗)阵又不修改故障所在互感支路导纳阵的条件下,导出了一种快速计算电力系统双重故障的口网络法,该方法物理概念清晰,计算速度快,各序电气量有统一的计算公式,较其它方法简便,适用于电力系统故障分析,继电保护整定计算及其工况分析。

关键词 双重故障 快速口网络法

引言

随着电力系统中单相自动重合闸和串补电容等设备的普遍采用,电力系统发生双重故障的几率明显增加。在这种情况下,为确保继电保护正确动作,新的《继电保护整定条例》(送审稿)^[1]中提出应以双重复故障进行继电保护定值校核。

双重故障是一种最简单的复杂故障,相应的计算方法有多种^[2~5],其中的口网络法简单直观,易于编制程序,在工程计算中得到了广泛的应用。但是,利用现有的口网络法计算双重故障,必须形成故障系统的各序节点导纳(或阻抗)阵,来反映双重故障造成的系统拓扑结构的变化,即:各序网中出现的两个故障口,计算量较大,特别是当故障线路存在零序互感时。

本文首先将互感线路断线转化成切除无互感支路,在此基础上,利用迭加原理和互易定理,导出了一种既不需形成故障系统各序节点导纳(或阻抗)阵又不需修改故障所在互感支路导纳阵,快速计算电力系统双重故障的口网络法,并用算例做了验证。

1 各序网故障口参数的计算

1.1 一故障口为断线口另一故障口为短路口

(1)断线和短路发生在同一线路上

设*i-j*支路*i*侧断线,同时在距*i*母线 α 百分点处又发生短路故障,见图1。

为把互感线路断线转变成切除无互感支路,在断线口*it*之间加入两个阻值为 -1.0Ω 和 1.0Ω 的串联支路,这样处理后,互感线路*i-j*断线等效于切除 1.0Ω 支路,而切除 1.0Ω 支路可以采用补偿法。^[6]

根据故障口参数的物理意义和迭加原理,由图1可求得各故障口参数。

$$Z_{11} = \dot{V}_{it}^{(1)'} = \dot{V}_{it}^{(1)} + \dot{V}_{it}^{(1'')} \dot{I}_{f1} = \dot{I}_{f1}$$

$$Z_{12} = Z_{21} = \dot{V}_d^{(1)'} = \dot{V}_d^{(1)} + \dot{V}_d^{(1'')} \dot{I}_{f1} = \dot{V}_d^{(1)} \dot{I}_{f1}$$

式中,补偿电流可由文献^[6]求得:

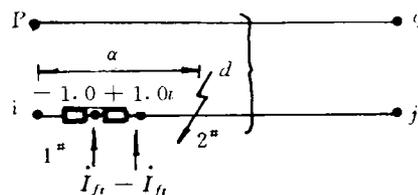


图1 断线和短路在同一线路上

本文1994年5月7日收稿

《继电器》1994年第4期 3

$$I_{ft} = -1 / (\dot{V}_{ft}^{(t)} - 1.0)$$

$$Z_{22} = \dot{V}_d^{(d)'} = \dot{V}_d^{(d)} + \dot{V}_d^{(d)} I_{ft}$$

式中, 补偿电流可由文献^[6]求得:

$$I_{ft} = -\dot{V}_d^{(t)} / (\dot{V}_{ft}^{(t)} - 1.0) = Z_{12}$$

综合上述, 并整理后:

$$Z_{11} = -1/Z_1 \tag{1}$$

$$Z_{12} = Z_{11} \cdot Z_2 \tag{2}$$

$$Z_{22} = Z_3 + Z_{12} \cdot Z_2 \tag{3}$$

式中 $Z_1 = \dot{V}_{ft}^{(t)} - 1.0 = Y_{ij-ij}(\dot{V}_{ij}^{(t)} - 1.0) + Y_{ij-pq}\dot{V}_{pq}^{(t)}$ ^[7]

$$Z_2 = \dot{V}_d^{(t)} = I_{fd}^{(d)} = Y_{ij-ij}\dot{V}_{ij}^{(d)} + Y_{ij-pq}\dot{V}_{pq}^{(d)} - (1-\alpha)$$
^[7]

$$Z_3 = \dot{V}_d^{(d)} = \alpha\dot{V}_j^{(d)} + (1-\alpha)\dot{V}_i^{(d)} + \alpha(1-\alpha)Z_{ij-ij}$$
^[2]

在上述公式中:

$$\dot{V}_k^{(t)} = I_{ij}^{(k)} = Y_{ij-ij}\dot{V}_{ij}^{(k)} + Y_{ij-pq}V_{pq}^{(k)} \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

$$\dot{V}_k^{(d)} = \alpha\dot{V}_j^{(k)} + (1-\alpha)\dot{V}_i^{(k)}$$
^[2] $(k=1, 2, \dots, n)$

(2) 断线和短路发生在不同线路上

设 $i-j$ 支路 i 侧断线, $l-m$ 支路上距 l 母线 α 百分点处发生短路, 见图 2。

根据口参数的物理意义和迭加原理, 由图 2 可求得各故障口参数:

$$Z_{11} = \dot{V}_{it}^{(it)'} = -1/Z_1 \tag{4}$$

$$Z_{12} = Z_{21} = \dot{V}_d^{(it)'} = Z_4 \cdot Z_{11} \tag{5}$$

$$Z_{22} = \dot{V}_d^{(d)'} = Z_5 + Z_{12} \cdot Z_4 \tag{6}$$

式中 $Z_4 = \dot{V}_d^{(t)} = \dot{V}_{ij}^{(d)} = Y_{ij-ij}\dot{V}_{ij}^{(d)} + Y_{ij-pq}V_{pq}^{(d)}$

$$Z_5 = \dot{V}_d^{(d)} = \alpha\dot{V}_m^{(d)} + (1-\alpha)\dot{V}_l^{(d)} + \alpha(1-\alpha)Z_{lm-lm}$$

在上述公式中:

$$\dot{V}_k^{(d)} = \alpha\dot{V}_m^{(k)} + (1-\alpha)\dot{V}_l^{(k)} \quad (k=1, 2, \dots, n)$$

1.2 两故障口均为断线口

设 $i-j$ 支路 i 侧, $l-m$ 支路 l 侧发生断线故障, 见图 3。

$$Z_{11} = \dot{V}_{it}^{(it)'} = -Z_6/Z_8 \tag{7}$$

$$Z_{12} = Z_{21} = \dot{V}_{lv}^{(it)'} = Z_7/Z_8 \tag{8}$$

$$Z_{22} = \dot{V}_{lv}^{(lv)'} = -Z_1/Z_8 \tag{9}$$

式中 $Z_6 = \dot{V}_{rv}^{(rv)} - 1.0$

$$= Y_{lm-lm}(\dot{V}_{lm}^{(rv)} - 1.0) + Y_{lm-st}V_{st}^{(rv)}$$
^[7]

$$Z_7 = \dot{V}_{rv}^{(t)} = I_{ij}^{(rv)} = Y_{ij-ij}\dot{V}_{ij}^{(rv)} + Y_{ij-pq}V_{pq}^{(rv)}$$

$$Z_8 = Z_1 \cdot Z_6 - Z_7^2$$

在上述公式中 $\dot{V}_k^{(rv)} = \dot{V}_{rv}^{(k)} = I_{lm}^{(k)} = Y_{lm-lm}\dot{V}_{lm}^{(k)} + Y_{lm-st}V_{st}^{(k)}$ $(k=1, 2, \dots, n)$

1.3 两故障口均为短路口

根据口参数的物理意义和迭加原理, 由图 3 可求得各故障口参数:

设 $i-j, l-m$ 支路上距 i 母线 α 百分点处、距 l 母线 β 百分点处发生短路, 见图 4。

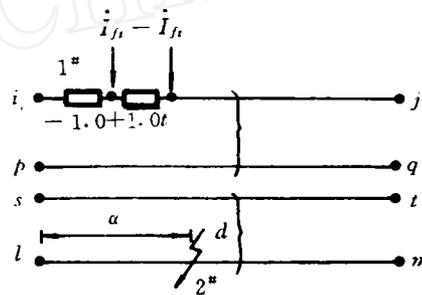


图 2 断线和短路在不同线上

根据口参数的物理意义,由图 4 可求得各故障口参数。

$$Z_{11} = \dot{V}_{d1}^{(1)} = \alpha^2 \dot{V}_j^{(1)} + 2\alpha(1-\alpha) \dot{V}_j^{(1)} + (1-\alpha)^2 \dot{V}_i^{(1)} + \alpha(1-\alpha) Z_{ij-ij} \quad (10)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = \dot{V}_{d2}^{(1)} = \alpha\beta \dot{V}_m^{(1)} + (1-\alpha)\beta \dot{V}_m^{(1)} + \alpha(1-\beta) \dot{V}_i^{(1)} + (1-\alpha)(1-\beta) \dot{V}_i^{(1)} \quad (11)$$

$$Z_{22} = \dot{V}_{d2}^{(2)} = \beta^2 \dot{V}_m^{(2)} + 2\beta(1-\beta) \dot{V}_m^{(2)} + (1-\beta)^2 \dot{V}_l^{(2)} + \beta(1-\beta) Z_{lm-lm} \quad (12)$$

在 1~12 式中,令互导纳 Y_{ij-pq} 、 Y_{lm-st} 为零矩阵,既得到零序无互感支路或正(负)序支路故障口 Z 参数的计算公式。故障口的 Y 参数和 H 参数可由 Z 参数求得^[2]。

在上面和下面的公式中,未加说明的符号符合如下规定:

$\dot{V}_m^{(1)}$ 为在原网中任意节点 i 加入正单位电流时,任意节点 m 的电压,即: $\dot{V}_m^{(1)}$ 等于原网节点阻抗阵的第 i 行第 m 列元素 Z_{im} ; $\dot{V}_m^{(1)} = \dot{V}_i^{(1)} - \dot{V}_j^{(1)}$; $\dot{V}_{pq}^{(1)} = \dot{V}_p^{(1)} - \dot{V}_q^{(1)}$; Z_{ij-ij} 为任意支路 i-j 的支路阻抗。

2 各序网故障口电流的计算

根据口网络理论^[2],各种双重故障简化后的复合口网络方程如下:

仅以串-串型故障为例:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{1(0)} \\ \dot{I}_{2(0)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} \\ Z'_{21} & Z'_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} n_{1(1)} \dot{V}_{z1} \\ n_{2(1)} \dot{V}_{z2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} n_{1(1)} \\ n_{2(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(1)} \\ \dot{I}_{2(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{1(2)} \\ n_{2(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(2)} \\ \dot{I}_{2(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1(0)} \\ \dot{I}_{2(0)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 $z'_{11} = Z_{11(0)} + Z_{11(1)} + Z_{11(2)}$

$$Z'_{12} = Z_{12(0)} + \frac{n_{1(1)}}{n_{2(1)}} Z_{12(1)} + \frac{n_{1(2)}}{n_{2(2)}} Z_{12(2)}$$

$$Z'_{21} = Z_{21(0)} + \frac{n_{2(1)}}{n_{1(1)}} Z_{21(1)} + \frac{n_{2(2)}}{n_{1(2)}} Z_{21(2)}$$

$$Z'_{22} = Z_{22(0)} + Z_{22(1)} + Z_{22(2)}$$

$n_{i(j)}$ ($i = 1, 2; j = 0, 1, 2$) 为各故障口的正序和负序旋转因子;

\dot{V}_{z1} 和 \dot{V}_{z2} 为正序网故障口 1, 2 都开路时,端口 1, 2 的开路电压,其计算方法如下:

在图 1~4 中不计互感,既得到相应的正序等值电路。设系统内 1, 2, ..., s 号母线为发电机

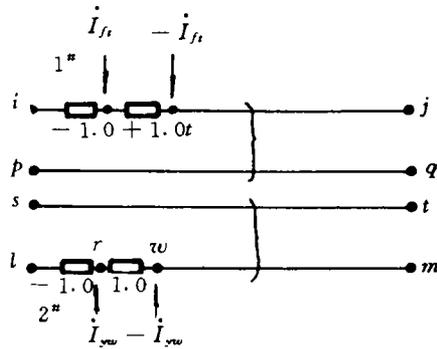


图 3 两故障口均为断线口

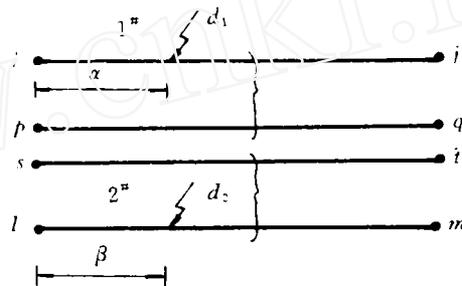


图 4 两故障口均为短路口

母线, E_k 和 Z_k 分别为第 K 台发电机的电势和等值电抗, 根据迭加原理:

$$\dot{V}_K = \sum_{k=1}^n \dot{V}_t^{(k)} \frac{E_k}{Z_k} \quad (t = 1, 2) \quad (15)$$

式中 $\dot{V}_t^{(k)} = \dot{V}_K^{(t)}$ ($t = 1, 2$) 为仅在正序网故障口 t 加入正单位电流时, 任意母线 K 的电压 ($\dot{V}_K^{(1)}, \dot{V}_K^{(2)}$) 的具体计算方法见下面 3.1~3.3 节)。

3 各序网任意母线电压的计算

根据迭加原理, 由图 1~4。

$$\dot{V}_K = \dot{V}_K^{(1)} \dot{I}_1 + \dot{V}_K^{(2)} \dot{I}_2 \quad (K=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

式中, $\dot{V}_K^{(1)}, \dot{V}_K^{(2)}$ 分别为仅在故障口 1 或 2 注入正单位电流时, 任意母线 K 的电压, 其计算方法与故障口的种类有关。

3.1 一故障口为断线口, 一故障口为短路口

(1) 断线和短路发生在同一线路上

根据迭加原理, 由图 1:

$$\dot{V}_K^{(1')} = \dot{V}_K^{(t')} = \dot{V}_K^{(t')} + \dot{V}_K^{(t')} \dot{I}_{ft} = \dot{V}_K^{(t')} \cdot Z_{11} \quad (17)$$

$$\dot{V}_K^{(2')} = \dot{V}_K^{(d')} = \dot{V}_K^{(d')} + \dot{V}_K^{(t')} \dot{I}_{ft} = \dot{V}_K^{(d')} + \dot{V}_K^{(t')} \cdot Z_{12} \quad (18)$$

(2) 断线和短路发生在不同线路上

由图 2 可求出 $\dot{V}_K^{(1')}$ 和 $\dot{V}_K^{(2')}$ 与 17、18 式相同, 但式中:

$$\dot{V}_K^{(d')} = \beta \dot{V}_m^{(k)} + (1 - \beta) \dot{V}_l^{(k)}$$

3.2 两故障口均为断线口

根据迭加原理, 由图 3:

$$\dot{V}_K^{(1')} = \dot{V}_K^{(t')} = \dot{V}_K^{(t')} \cdot Z_{11} + \dot{V}_K^{(rw)} \cdot Z_{12} \quad (19)$$

$$\dot{V}_K^{(2')} = \dot{V}_K^{(w')} = \dot{V}_K^{(t')} \cdot Z_{12} + \dot{V}_K^{(rw)} \cdot Z_{22} \quad (20)$$

式中 $\dot{V}_K^{(rw)} = \dot{V}_K^{(k)} = \dot{I}_{im}^{(k)} = Y_{im-im} \dot{V}_{im}^{(k)} + Y_{im-st} V_{st}^{(k)}$

3.3 两故障口均为短路口

根据迭加原理, 由图 4:

$$\dot{V}_K^{(1')} = \dot{V}_K^{(d1')} = \alpha \dot{V}_j^{(k)} + (1 - \alpha) \dot{V}_i^{(k)} \quad (21)$$

$$\dot{V}_K^{(2')} = \dot{V}_K^{(d2')} = \beta \dot{V}_m^{(k)} + (1 - \beta) \dot{V}_l^{(k)} \quad (22)$$

4 各序网任意支路电流的计算

4.1 故障支路电流

(1) 断线和短路发生在同一线路上

根据基尔霍夫电流定律, 由图 1:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{td} &= -\dot{I}_1 \\ \dot{I}_{ij} &= \dot{I}_2 - \dot{I}_1 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

(2) 断线和短路发生在不同线路上

由图 2:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{ij} &= -\dot{I}_1 \\ \dot{I}_{td} &= Y_{im-im} \dot{V}_{im} + Y_{im-st} V_{st} - (1 - \alpha) \dot{I}_2^{[7]} \\ \dot{I}_{dm} &= \dot{I}_2 + \dot{I}_{td} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

(3) 两故障口均为断线口

由图 3:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{ij} &= -\dot{I}_1 \\ \dot{I}_{xm} &= -\dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

(4) 两故障口均为短路口

由图 4:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{id} &= Y_{ij-ij} \dot{V}_{ij} + Y_{ij-pq} V_{pq} - (1-\alpha) \dot{I}_1^{[7]} \\ \dot{I}_{dj} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_{id} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{ld} &= Y_{lm-lm} \dot{V}_{lm} + Y_{lm-st} V_{st} - (1-\beta) \dot{I}_2^{[7]} \\ \dot{I}_{dm} &= \dot{I}_2 + \dot{I}_{ld} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

4.2 非故障支路电流

4.2.1 无互感支路

$$\dot{I}_{ij} = \dot{V}_{ij} / Z_{ij-ij} \quad (28)$$

4.2.2 故障所在互感支路组

(1) 断线和短路发生在同一线路上

由图 1, $t-j$ 支路上 d 点短路时互感支路电压方程增加一阶, 但 \dot{I}_{id} 和 \dot{I}_{dj} 已由 23 式求出, 将 23 式代入互感支路电压方程后可解得:

$$\dot{I}_{pq} = Y_{pq-ij} \frac{(1-\alpha) \dot{I}_2 - \dot{I}_1 - Y_{ij-pq} V_{pq}}{Y_{ij-ij}} + Y_{pq-pq} Y_{pq} \quad (29)$$

(2) 断线和短路发生在不同线路上

由图 2, $\dot{I}_{ij} = -\dot{I}_1$, 利用此式消去互感支路电流方程中的 \dot{V}_{ij} , 既得到:

$$\dot{I}_{pq} = Y_{pq-ij} \frac{-\dot{I}_1 - Y_{ij-pq} V_{pq}}{Y_{ij-ij}} + Y_{pq-pq} Y_{pq} \quad (30)$$

$$\dot{I}_{st} = Y_{st-lm} \dot{V}_{lm} + Y_{st-st} V_{st}^{[7]} \quad (31)$$

(3) 两故障口均为断线口

由图 3: $\dot{I}_{pq} = (30)$ 式; $\dot{I}_{st} = Y_{st-lm} \frac{-\dot{I}_2 - Y_{lm-st} V_{st}}{Y_{lm-lm}} + Y_{st-st} V_{st} \quad (32)$

(4) 两故障口均为短路口

由图 4:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{pq} &= Y_{pq-ij} \dot{V}_{ij} + Y_{pq-pq} V_{pq}^{[7]} \\ \dot{I}_{st} &= Y_{st-lm} \dot{V}_{lm} + Y_{st-st} V_{st}^{[7]} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

4.2.3 其它组互感支路

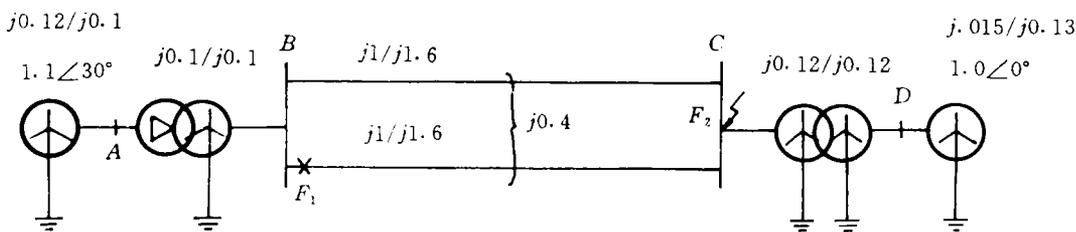


图 5 算例系统接线图

$$\begin{bmatrix} I_{ij} \\ I_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ij-ij} & Y_{ij-pq} \\ Y_{pq-ij} & Y_{pq-pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ij} \\ V_{pq} \end{bmatrix} \quad (34)$$

5 算例

系统如图 5, 图中参数为 $S_b=100\text{MVA}$ 下的标么值, 分子为正(负)序电抗, 分母为零序电抗。当 F_1 处 A、B 相断线、 F_2 处 B 相接地时, 试计算: (1) 两故障口阻抗参数; (2) 两故障口电流; (3) B 母线和 C 母线电压; (4) 流经故障线路 B—C 的电流。

计算结果如表 1 所示

表 1 算例计算结果

序分量 电气量	正序	负序	零序
端口 1 自阻抗	$j1.329$	$j1.329$	$j1.662$
端口 1、2 间互阻抗	$-j0.181$	$-j0.181$	$-j0.154$
端口 2 自阻抗	$j0.221$	$j0.221$	$j0.218$
端口 1 电流	$0.078 \angle -179^\circ$	$0.078 \angle 61^\circ$	$0.078 \angle -59^\circ$
端口 2 电流	$1.507 \angle 96^\circ$	$1.507 \angle 215^\circ$	$1.507 \angle -24^\circ$
B 母线电压	$1 \angle 27^\circ$	$0.05 \angle -60^\circ$	$0.023 \angle 59^\circ$
C 母线电压	$0.655 \angle 7^\circ$	$0.346 \angle -54^\circ$	$0.319 \angle 67^\circ$
B—C 线路电流	$0.078 \angle -359^\circ$	$0.078 \angle 241^\circ$	$0.078 \angle -239^\circ$

6. 结论

本文系统地研究了电力系统双重故障的计算方法, 导出了既不需修改原网各序节点导纳(或阻抗)阵又不需修改互感支路导纳阵, 快速计算电力系统双重故障的口网络法。该方法计算速度快、各序网处理方法统一、较其它方法简便。

如何将本文思想推广到 N 重复复杂故障, 是需要进一步研究的课题。

参考文献

- 1 华东电管局. 220~500kV 电网继电保护装置整定条例. 1991 年 11 月
- 2 西安交大等校合编. 电力系统计算. 北京: 水利电力出版社, 1978 年
- 3 V. Brandwajn, et al. Generalized Method of Fault Analysis. IEEE Trans. on PAS, 1985; 104 (6)
- 4 G. Gross, et al. A Two-step Compensation Method for Solving Short Circuit Problems. IEEE Trans on PAS, 1982; 101
- 5 Vladimir C. Strezoski, et al. A Canonical Model for the Study of Faults in Power Systems. IEEE Trans on Power System, 1991; 6 (4)
- 6 Cao Guochen. A New Method of Solving Fault Problems With Network Changes in Topology. Proc. of the IPEC'93, Singapore, 1993
- 7 陈永琳、曹国臣. 零序电流保护整定计算的算法和程序. 东北电力学院学报, 1985, (2)