

⑫
70-76

变结构与变参数 电力系统短路故障的快速计算*

HIGH SPEED CALCULATIONS OF SHORT CIRCUIT FOR POWER
SYSTEMS WITH VARIABLE STRUCTURES AND PARAMETERS

米麟书

刘芳宁

陈刚

TM713

Mi Linshu

Liu Fangning

Chen Gang

(重庆大学电气工程系)

(重庆大学计算中心)

摘要 本文提出了变结构与变参数电力系统短路故障口的各序等值电路参数和口电流的一种新的数字仿真计算模型。同时只需详细计算单相接地短路电流的电气量值,利用同序口电流比例系数,便可快速算出同一位置其它各型短路电气量值。本方法完全避免了各序网节点导纳或阻抗矩阵的修正计算与各型故障计算中的重复计算,具有通用、精确和快速计算的特点。

关键词 电力网络分析,电力系统,电力系统计算

短路,变结构,变参数

中国图书资料分类法分类号 TM711

ABSTRACT This paper presents a new method for digital simulation of equivalent circuit parameters and port currents of the short circuit fault port for each sequence networks in power systems with variable configuration and parameters. If the electric values for single-line-to-ground short circuit are calculated in detail, the other faults at the same location can be rapidly obtained by using the proportional coefficients of the same sequence port current. In this method, the modifications of Z-bus or Y-bus matrices for each sequence network, and the repeated of calculations of the short circuit calculation have been completely avoided.

KEY WORDS electric network analysis; power system; power system computation

0 引 言

在电力系统分析计算与继电保护整定计算和工况分析中,常常需要进行变结构与变参数情况下的各型短路故障电气量值的计算,其中对于三相对称短路故障,因为只需用到正序网络,故可直接应用解算伴有拓扑结构与参数变化网络的方法[1]进行分析计算,但对于非对称短路故障计算,需要用到正、负序或正、负、零序网络,直接应用以[1]为基础的方法[2],须以反映原网络变化的负序及零序等值链支支路阻抗 z_{m2} 、 z_{m0} 分别修改负序、零序原网络的

* 收文日期 1990-11-30

节点阻抗矩阵 Z_2 、 Z_0 中与故障口关联节点的列元素；对于有源正序网络，须将反映网络变化的正序等值链支支路阻抗 z_{eq1} 与反映故障边界条件的等值链支 $z^{(a)}$ 同时考虑。直接用文献 [2] 计算非对称故障计算量仍然较大的根本原因是由于故障口三序网的相互依赖性造成的，本文对此进行了研究。

众所周知，应用对称分量法和节点分析法计算短路故障的关键问题是快速正确地算出各序网故障口的等值电路参数——各序网故障口的等值阻抗及正序网故障口的开路电压，并应用反映故障口边界条件的等值复合序网的概念算出各序网的故障口电流。本文根据工程上一般视正序网与负序网的阻抗参数相同，在已知系统基本运行方式下各序网络（原网络）节点阻抗矩阵 Z_s ($s = 1, 2, 0$) 与正序网节点电流源 I_1 的情况下，采用文献 [1~2] 提出的各序网接入等值链支支路阻抗 z_{eqs} 来反映系统的变化，首先根据开路试验和短路试验的原理确定等值参数的方法，算出变结构与变参数系统的正序网故障口的等值阻抗 Z_{p1} 与开路电压 V_{p1} ，然后再计及系统变化与故障边界条件构成独立复合等值零序网与独立复合等值负序网的新概念，分别用文献 [1] 的方法，先零序后负序依次算出其故障口电流 I_{p0} 、 I_{p2} 与阻抗 Z_{p0} 以及等值链支电流 i_{eq0} 、 i_{eq2} ，并用所算得的这些电流构成独立零序网与独立负序网的节点电流源，从而可用各序原网络的节点阻抗矩阵和新建立的节点电流源算出各序网的节点电压、支路电流。本文还根据线性网络特性，只需详细计算单相接地短路情况下的各序口电流、节点电压与支路电流，利用同一短路位置的各型短路与单相接地短路故障同序口电流的比例系数，便能极其迅速地算出其余各种短路故障的电气量值。本文提出的算法，完全避免了对各序原网络节点阻抗或导纳矩阵的修正计算与各型短路故障的某些重复计算量，对不计算系统元件电阻的短路计算尤为有效。

1 正序网故障口的等值电路参数计算

如图 1 虚线框所示为系统基本运行方式的正序原网络，已知其节点阻抗矩阵为 Z_1 ，节点电流源为 I_1 ，节点电压为 V_1 。

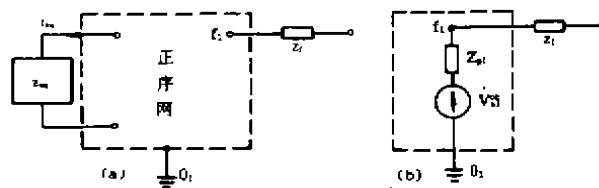


图 1 正序网络 (a) 及其故障口等值电路 (b)

当系统结构与参数发生变化时，其反映于接入正序网的等值链支支路阻抗为 z_{eq1} [1]。若该网络中的故障口节点 f_1 经阻抗 z_1 短路时，则反映正序网总变化的等值链支路阻抗为

$$z_1 = \left[\begin{array}{c|c} z_{eq1} & 0 \\ \hline 0 & z_1 \end{array} \right] \quad (1)$$

根据广义戴维南定理或由文献[1],可得 z_1 支路中的电流为

$$i_1 = \begin{bmatrix} i_{e_1} \\ \dots \\ i_{f_1} \end{bmatrix} = [A_1^T Z_1 A_1 + z_1]^{-1} A_1^T Z_1 I_1^* \quad (2)^*$$

式中 A_1 、 A_1^T 为正序网节点对支路 z_1 的关联矩阵及其转置。

式(2)的计算颇具规律性,可直观进行计算,易于编程,这里引入 A_1 、 A_1^T 主要是为了便于数学描述。

显然,式(2)中的 i_{f_1} 就是正序网故障口的短路电流,亦即三相短路电流

$$I_{f_1}^{(3)} = i_{f_1} \quad (3)$$

根据迭加原理,可得变结构与变参数系统三相短路时,正序网的节点等值电流源为

$$I_1^* = I_1 - A_1 i_1 \quad (4)$$

应用已知的 Z_1 和等值电流源 I_1^* ,由正序网节点阻抗方程和欧姆定律,可算出三相短路情况下任意节点 h 的电压与任意支路 $r-j$ 的电流为

$$V_{h1} = \sum_{k=1}^{n_1} Z_{hk1} I_{k1}^* \quad (5)$$

$$I_{rj1} = \frac{1}{z_{rj1}} \sum_{k=1}^{n_1} (Z_{rk1} - Z_{jk1}) I_{k1}^* \quad (6)$$

式中 z_{rj1} 为 $r-j$ 支路的正序阻抗。

从图 1(a) 可知,当故障口开路时,接入正序原网络的等值链支为

$$z_1 = z_{e_1} \quad (7)$$

对比式(1)、(7)可知,后者为前者的一个子块**仿式(2)、(4)、(6)的计算过程,可得故障口开路时 z_{e_1} 中的电流 i_1 、节点电流源 I_1^* 、节点电压 V_1^* 、支路电流 I_{rj1}^* 分别为

$$i_1 = [A_1^T Z_1 A_1 + z_{e_1}]^{-1} A_1^T Z_1 I_1^* \quad (8)$$

$$I_1^* = I_1 - A_1 i_1 \quad (9)$$

$$V_1^* = Z_1 I_1^* \quad (10)$$

$$I_{rj1}^* = \frac{V_{r1}^* - V_{j1}^*}{z_{rj1}} = \frac{1}{z_{rj1}} \sum_{k=1}^{n_1} (Z_{rk1} - Z_{jk1}) I_{k1}^* \quad (11)$$

其中 A_1 与 A_1^T 为正序网节点对 z_{e_1} 的关联矩阵及其转置。

由式(10)可得故障点 f_1 的开路电压为

$$V_{f_1}^* = \sum_{k=1}^{n_1} Z_{fk1} I_{k1}^* \quad (12)$$

根据欧姆定律可得正序网故障端节点 f_1 、 0_1 间的等值阻抗为

$$Z_{p1} = \frac{V_{f_1}^*}{I_{f_1}^{(3)}} = z_f \quad (13)$$

因此,应用上述计算结果,可作出正序网故障口的等值电路如图 1(b) 所示,其中 $V_{f_1}^* = V_{f_1}^*$ 。

* 如果旨在求取正序网故障口等值阻抗,则只需计算 i_{f_1} 。

** 为避免重复计算以减少总的计算工作量,在第一次计算式(2)时,宜用分块求逆法。

2 单相接地短路各序电气量值的计算

2.1 零序电压、电流计算

单相接地短路故障的边界条件是各序口电流相等、各序口电压之和为零,满足这一边界条件的等值电路是将三序网的故障口等值电路互相串联,这就是众所周知的复合序网。这种复合序网的特点是故障口电路上的相互依赖性。在正序网与负序网阻抗参数相同的情况下,由复合序网可得出新的独立复合等值零序网如图 2 所示。从而可直接应用文献[1]的方法独立进行零序口参数和零序电气量值的计算。

设系统基本运行方式下的无源零序原网络如图 2 的虚线框所示,其节点阻抗矩阵为

Z_0 。图 2 中的 z_{eq0} 为系统结构与参数变化反映于接入零序网的等值链支支路阻抗。图 2 右侧的电流源支路是反映复合序网中有源正序与无源负序网对零序网影响的等值电路。因此,接入零序网的总等值链支支路阻抗为

$$z_0 = \begin{bmatrix} z_{eq0} & 0 \\ 0 & 2(Z_{f1} + 1.5z_f) \end{bmatrix} \quad (14)$$

仿式(2)、(4)可得 z_0 中的电流 i_0 及零序网的节点等值电流源 I_0 为

$$i_0 = \begin{bmatrix} i_{eq0} \\ \dots \\ i_{p0} \end{bmatrix} = [A_0^T Z_0 A_0 + z_0]^{-1} A_0^T Z_0 I_0 \quad (15)$$

$$I_0 = I_0 - A_0 i_0 \quad (16)$$

式中

$$I_0 = [0 \quad -I_{p0} \quad 0]^T \quad (17)$$

A_0, A_0^T 为零序网络节点对 z_0 支路的关联矩阵及其转置。

因此,根据图 2 可得单相接地故障口电流为

$$I_{f0}^{(D)} = I_{f1}^{(D)} = I_{f2}^{(D)} = I_{p0} + i_{p0} \quad (18)$$

零序网的节点电压为

$$V_0 = Z_0 I_0 \quad (19)$$

其中任意节点的电压为

$$V_{k0}^{(D)} = \sum_{k=1}^{n_0} Z_{k0} i_{k0} \quad (20)$$

故障点 f_0 的开路电压为

$$V_{f0}^{(D)} = V_{f0}^{(D)} = \sum_{k=1}^{n_0} Z_{fk0} i_{k0} \quad (21)$$

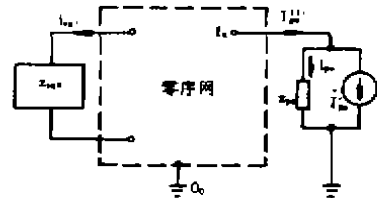


图 2 单相接地短路的独立复合等值零序网

图中: $z_{p0} = 2(Z_{f1} + 1.5z_f)$

$I_{p0} = V_{f1}^{(D)}/2(Z_{f1} + 1.5z_f)$

零序网故障端口节点 $f_0, 0_0$ 间的等值阻抗为

$$Z_{f_0} = -V_{f_0}^{(0)} / I_{f_0}^{(0)} \quad (22)$$

零序网任意支路 $r-j$ 的电流为

$$I_{rj}^{(0)} = \frac{1}{Z_{rj0}} \sum_{k=1}^{n_0} (Z_{rk0} - Z_{jk0}) I_{k0} \quad (23)$$

2.2 负序电压、电流计算

图3所示为独立复合等值负序网络,其中虚线框所示为负序原网络,原网络的节点阻抗矩阵为 Z_2 , 负序网电流已于式(18)求出, z_{eq2} 是反映系统变化而接入负序原网络的等值链支阻抗。

对图3可直接应用文献[1]的方法计算。仿式(2)可快速得出 z_{eq2} 中的电流 i_{eq2} 为

$$i_{eq2} = [A_2^T Z_2 A_2 + z_{eq2}]^{-1} A_2^T Z_2 I_2 \quad (24)$$

式中

$$I_2 = [0 \quad -I_{p(2)} \quad 0]^T$$

因此,负序网的节点等值电流源为

$$I_2 = I_2 - A_2 i_{eq2} \quad (25)$$

负序网的节点电压为

$$V_2 = Z_2 I_2 \quad (26)$$

其中任意节点 h 的负序电压为

$$V_h^{(2)} = \sum_{k=1}^{n_2} Z_{hk2} I_{k2} \quad (27)$$

任意支路 $r-j$ 的负序电流为

$$I_{rj}^{(2)} = \frac{1}{Z_{rj2}} \sum_{k=1}^{n_2} (Z_{rk2} - Z_{jk2}) I_{k2} \quad (28)$$

式中 z_{rj2} 为支路 $r-j$ 的负序阻抗

2.3 正序电压、电流计算

对于单相短路,由于 $Z_1 = Z_2$,所以正序网的节点电压、支路电流的故障分量 $V_{f1}^{(1)}, I_{f1}^{(1)}$ 与负序网的节点电压、支路电流相等,即

$$V_{f1}^{(1)} = V_{f2}^{(2)} \quad (29)$$

$$I_{f1}^{(1)} = I_{f2}^{(2)} \quad (30)$$

根据叠加原理,由上式和式(10)、(11)可得正序网的节点电压为

$$V_{f1}^{(1)} = V_{f1}^{(1)} + V_{f2}^{(2)} \quad (31)$$

$$I_{f1}^{(1)} = I_{f1}^{(1)} + I_{f2}^{(2)} \quad (32)$$

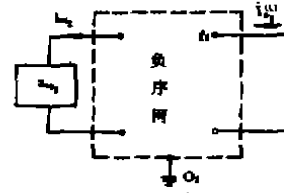


图3 独立复合等值负序网

3 非单相接地短路电气量值的快速计算

根据线性网络特性,各型短路故障的各序节点电压与支路电流的故障分量同各序故障口电流成正比。并由于系统同一运行方式和同一短路故障处的各序等值电路参数相同,所以详细算得单相接地短路的电气量值之后,利用非单相接地短路与单相接地短路的同序口电流比值系数,便可快速算出各型非单相接地短路故障的电气量值。

众所周知,在 Z_1 与 Z_2 相等的情况下,由惯用复合序网概念,可得短路点 f 处的各型短路故障的各序口电流为

$$I_{f1}^{(3)} = \frac{V_{f1}^{\infty}}{Z_{ff1} + z_f} \tag{33}$$

$$I_{f1}^{(2)} = -I_{f2}^{(2)} = \frac{V_{f1}^{\infty}}{2(Z_{ff1} + z_f)} \tag{34}$$

$$I_{f1}^{(1)} = I_{f2}^{(1)} = I_{f0}^{(1)} = \frac{V_{f1}^{\infty}}{2(Z_{ff1} + z_f) + Z_{ff0} + z_f} \tag{35}$$

$$I_{f1}^{(1,1)} = \frac{V_{f1}^{\infty}}{Z_{ff1} + z_f + \frac{(Z_{ff1} + z_f)(Z_{ff0} + z_f)}{(Z_{ff1} + z_f) + (Z_{ff0} + z_f)}} \tag{36}$$

$$I_{f2}^{(1,1)} = -\frac{Z_{ff0} + z_f}{(Z_{ff1} + z_f) + (Z_{ff0} + z_f)} I_{f1}^{(1,1)} \tag{37}$$

$$I_{f0}^{(1,1)} = -\frac{Z_{ff1} + z_f}{(Z_{ff1} + z_f) + (Z_{ff0} + z_f)} I_{f1}^{(1,1)} \tag{38}$$

令
$$k = \frac{Z_{ff0} + z_f}{Z_{ff1} + z_f} \tag{39}$$

$$k_s^{(m)} = \frac{I_{fs}^{(m)}}{I_{f1}^{(1)}}, \quad s = 1, 2, 0 \tag{40}$$

$(m) = (3), (2), (1, 1)$

式中上标 m 表示故障类型。

根据式(33)~(40),可得单相接地短路与非单相接地短路的同序口电流比值系数 $k_s^{(m)}$,如表所示。

同序口电流比值系数 $k_s^{(m)}$ 表

| 故障类型 | $k_1^{(m)}$ | $k_2^{(m)}$ | $k_0^{(m)}$ |
|----------------------------|------------------------------|-----------------|---------------------|
| 三相短路 (m) = (3) | $2 + k$ | 0 | 0 |
| 两相短路 (m) = (2) | $1 + 0.5k$ | $-1 - 0.5k$ | 0 |
| 两相接地短路 (m) = (1, 1) | $-k_2^{(1,1)} - k_0^{(1,1)}$ | $k k_0^{(1,1)}$ | $-\frac{2+k}{1+2k}$ |

因此,根据线性网络特性和式(40),可得 m 型短路时节点 h 的各序电压与 $r-j$ 支路的各序电流计算公式为

$$\begin{bmatrix} V_{i0}^{(n)} \\ V_{i2}^{(n)} \\ V_{i1}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_0^{(n)} V_{i0}^{(1)} \\ k_2^{(n)} V_{i2}^{(1)} \\ V_{i1}^{(c)} + k_1^{(n)} V_{i2}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\begin{bmatrix} I_{rj0}^{(n)} \\ I_{rj2}^{(n)} \\ I_{rj1}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_0^{(n)} I_{rj0}^{(1)} \\ k_2^{(n)} I_{rj2}^{(1)} \\ I_{rj1}^{(c)} + k_1^{(n)} I_{rj2}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (42)$$

本文提出的方法,经大量数字算例验算和比较(限于篇幅,从略),证明是正确的和有效的。

5 结 论

本文提出了变结构与变参数电力系统各序网短路故障口等值电路参数的一种新算法、独立复合等值零序网与负序网的新概念及其构成方法。用这种方法计算短路电气量值,无需修改各序网节点阻抗或导纳矩阵。对系统同一运行方式下的同一位置的各种短路,只需详细计算单相接地短路的电气量值,应用非单相接地与单相接地的同序口电流比例系数,便可快速算出各非单相接地短路的电气量值,避免了重复计算。大量数字算例表明,本算法是正确有效的,较现有方法显著地减少了计算量。本算法对大型电力系统继电保护的整定计算与工况分析尤为有效,并可推广用于非对称断相计算和分块计算。

参 考 文 献

- 1 刘芳宁,米麟书. 大型电力网络节点阻抗方程的形成及其修正的统一算法. 重庆大学学报, 1987, 10(4): 65~73
- 2 米麟书,刘芳宁. 伴有拓扑结构与参数变化的大型电力系统故障的计算方法. 重庆大学学报 1988, 11(3): 81~89