

(2) b-11

# 变结构电力系统断相故障的新算法

A New Algorithm for Open Conductor Faults  
in Power Systems with Variable Structures

吕飞鹏  
Lü Feipeng

米麟书  
Mi Linshu

姜可薰  
Jiang Kexun

TM711

(重庆大学电气工程系, 重庆, 630044)

A

**摘要** 提出了一种仿真计算变结构与变参数电力系统不对称断相故障电气量值的新方法, 以求取各序网故障口的等值电路参数与故障口电流以及各序网的节点电压与支路电流的故障分量。并通过算例验证了本文方法。

**关键词** 电力网络分析; 电力系统计算 / 电力系统断相故障

变结构

中国图书资料分类法分类号 TM711

**ABSTRACT** A new method to calculate electric values of unsymmetrical open conductor faults in power systems with variable structures and parameters is proposed. All the fault components of nodal voltage or branch current and the equivalent parameters of open port for each sequence network can be obtained rapidly. The method presented here is much more understandable in contrast to those available, and meanwhile the amount of calculations is greatly reduced. Its effectiveness has been verified by numerical examples.

**KEYWORDS** electric network analysis; power system computation / open conductor faults in power system

## 0 引 言

现代电力系统设计、运行、事故分析、继电保护与自动装置的整定计算中, 常涉及到系统结构与参数变化情况下的非对称断相电气量值的计算问题。由于惯用复合序网故障口电路上的相互关联, 给变结构系统的故障计算带来了困难。文献[1]提出的方法虽较惯用的修正节点导纳或节点阻抗矩阵法显著节省了计算量, 但仍存在故障口等值参数与故障口电流计算较繁琐的缺陷, 且未能准确定义和算出正序电压、电流的故障分量。

本文提出的新算法, 只需进行一次与模拟系统结构变化的等值接入链支数同阶的口回路阻抗矩阵求逆, 利用独立复合等值序网概念, 能简捷算出各序口电流, 同时根据线性网络特性, 利用同序口电流比例系数, 可快速进行系统同一运行方式下同一位置两种不对称断相故障电气量值的互换计算。本方法具有计算过程简捷、清晰、易掌握等优点, 且能正确算出正

序节点电压、支路电流的正常分量及故障分量。

## 1 变结构系统断相故障的仿真模型

### 1.1 断相口的独立复合等值序网

根据文献[1],可得变结构系统中  $r-j$  支路上任意位置出现非对称断相时的各独立复合等值序网如图 1 图 2 所示,其中上标  $(n) = (10), (20)$ , 分别表示一相断开、两相断开状态;  $Z_r^{(s)}$  为正序网断相口的外加等值阻抗;  $I_{f1}^{(s)}, I_{f2}^{(s)}$  分别为断相口电流及其故障分量,下标  $(s) = (1), (2), (0)$  表示正、负、零序。

图 1 图 2 中,点线框为断相前的变结构系统;虚线框为系统结构变化前和断相前的原网络,已知其独立节点数为  $n_{(s)}$ ,节点阻抗矩阵为  $Z_{n_{(s)}}$ ,节点独立电流源为  $I_{n_{(s)}}^{(s)}, I_{n_{(2)}}^{(s)} = 0, I_{n_{(0)}}^{(s)} = 0$ ;  $z_{c(s)}$  为模拟系统结构和参数变化而接入原网络的等值链支支路阻抗矩阵<sup>[2]</sup>;  $z_f$  是断相口的过渡阻抗。断相前变结构系统正序网节点  $r_{(1)}, j_{(1)}$  间的开路电压为  $V_{rj_{(1)}}^{(1)}$ ,各序网节点  $r_{(s)}, j_{(s)}$  端口的等值阻抗为  $Z_{r_{(s)}}, Z_{j_{(s)}}$ 。

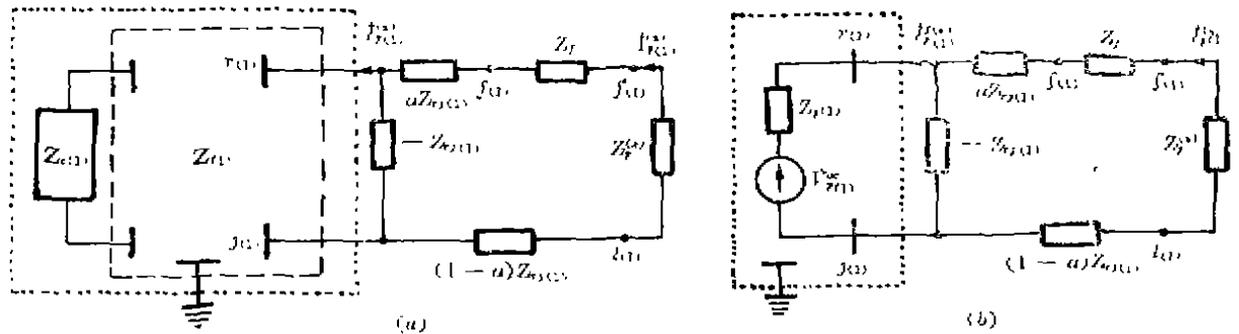


图 1 独立复合等值正序网(a) 及其等值电路(b)

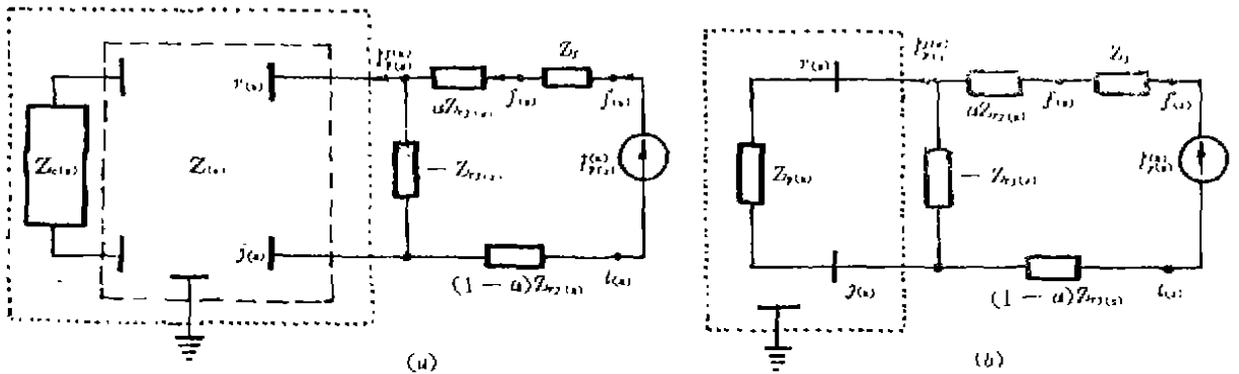


图 2 独立复合等值负、零序网(a) 及其等值电路(b)

$(s) = (0), (2)$

从图 1,图 2 可知,断口对各变结构独立序网的影响,等效于断口所关联的各序网络节点  $r_{(s)}, j_{(s)}$  间并接一条阻抗为  $-z_{c(s)}$  的链支,以及从  $r_{(s)}, j_{(s)}$  分别接入树支  $aZ_{r_{(s)}}, (1-a)Z_{r_{(s)}}, f_{(s)}, l_{(s)}$  是  $r-j$  支路上的由断口引起的新增节点。 $a$  表示断口的位置,其值为

$$a = l_{r,f} / l_{r-j} \quad (1)$$

式中  $l_{r,f}, l_{r-j}$  分别为  $r-j$  线路长度及断口节点  $f$  距线路  $r$  端的长度,显然  $0 \leq a \leq 1$ 。

### 1.2 等值阻抗 $Z_{r(s)}$ 的计算

断相前,令(s)序原网处于无源状态,仅于 $r(s), j(s)$ 端口注入单位电流源时, $z_{c(s)}$ 中的电流为 $I_{c(s)}$ ,以 $I_{c(s)}$ 代替 $z_{c(s)}$ ,可得注入原网节点的等值电流源为

$$I_{(s)}^* = I_{(s)}^0 - A_{(s)} I_{c(s)} \quad (2)$$

式中

$$I_{(s)}^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow \text{第 } r(s) \text{ 个元素} \\ \leftarrow \text{第 } j(s) \text{ 个元素} \end{array} \quad (3)$$

$A_{(s)}$  为(s)序原网节点对 $z_{c(s)}$ 支路的关联矩阵。

$$\text{等值链支 } z_{c(s)} \text{ 的支路电压方程为 } z_{c(s)} I_{c(s)} = A_{(s)}^T Z_{(s)} I_{(s)}^* \quad (4)$$

$$\text{式(2)代入式(4),可得 } I_{c(s)} = Z_{LL}^{-1} A_{(s)}^T Z_{(s)} I_{(s)}^* \quad (5)$$

$$\text{式中 } Z_{LL(s)} = A_{(s)}^T Z_{(s)} A_{(s)} + z_{c(s)}$$

$Z_{LL(s)}$  是包括 $z_{c(s)}$ 在内的各端口回路阻抗矩阵,可直观写出[2].  $A_{(s)}^T$  为 $A_{(s)}$ 的转置。

式(5)代入式(2),得

$$I_{(s)}^* = I_{(s)}^0 - A_{(s)} Z_{LL}^{-1} A_{(s)}^T Z_{(s)} I_{(s)}^* \quad (6)$$

由(s)序网节点阻抗方程可得节点电压为

$$V_{(s)}^* = Z_{(s)} I_{(s)}^* \quad (7)$$

于是可得任意节点 $k$ 的电压与任意支路 $b-k$ 的电流分别为

$$V_{k(s)}^* = \sum_{i=1}^{n(s)} Z_{ki(s)} I_{i(s)}^* \quad (8)$$

$$I_{b(s)}^* = \frac{1}{z_{b(s)}} \sum_{i=1}^{n(s)} (Z_{bi(s)} - Z_{ki(s)}) I_{i(s)}^* \quad (9)$$

因此, $r(s), j(s)$ 端口的等值阻抗为

$$Z_{r(s)} = (V_{r(s)}^* - V_{j(s)}^*) / 1 = \sum_{i=1}^{n(s)} (Z_{ri(s)} - Z_{ji(s)}) I_{i(s)}^* \quad (10A)$$

$$(10B)$$

## 2 正序正常分量及 $I_r^{(s)}, I_j^{(s)}$ 的计算

### 2.1 正常分量的计算

断相前,变结构正序网在 $I_{(1)}$ 作用下,仿式(6)可得正序原网节点的等值电流源为

$$I_{(1)}^* = I_{(1)}^0 - A_{(1)} Z_{LL}^{-1} A_{(1)}^T Z_{(1)} I_{(1)}^* \quad (11)$$

仿式(7)~(9),可得变结构正序网节点电压、支路电流的正常分量与 $V_{r(1)}^*$ 为

$$V_{(1)}^* = Z_{(1)} I_{(1)}^* \quad (12)$$

$$I_{b(1)}^* = \frac{1}{z_{b(1)}} \sum_{i=1}^{n(1)} (Z_{bi(1)} - Z_{ki(1)}) I_{i(1)}^* \quad (13)$$

$$V_{r(1)}^* = \sum_{i=1}^{n(1)} (Z_{ri(1)} - Z_{ji(1)}) I_{i(1)}^* \quad (14)$$

### 2.2 $I_r^{(s)}$ 及其 $I_j^{(s)}$ 的计算

由图 1(b),可得

$$I_{p(1)}^{(s)} = \dot{V}_{p(1)}^{(s)} / [Z_{p(1)}' + z_{r(1)} + z_f + Z_p^{(s)}] \quad (15)$$

式中

$$\dot{V}_{p(1)}^{(s)} = -z_{rj(1)} \dot{V}_{r(1)}^{(s)} / (Z_{r(1)} - z_{rj(1)}) \quad (16)$$

由复合序网概念或边界条件, 可得与断相类型( $\pi$ ) 有关的  $Z_p^{(s)}$ ,  $I_{p(1)}^{(s)}$  及  $I_{j(1)}^{(s)}$ , 如下表:

表 1

断相类型( $\pi$ )	$Z_p^{(s)}$	$I_{p(1)}^{(s)}$	$I_{j(1)}^{(s)}$
A 相断开 ( $\pi$ ) = (10)	$\frac{(Z_{K(2)} + z_{r(2)} + z_f)(Z_{j(0)} + z_{rj(0)} + z_f)}{Z_{p(2)} + z_{r(2)} + Z_{p(0)} + z_{rj(0)} + 2z_f}$	$\frac{-I_{K(1)}^{(s)} z_p^{(1s)}}{Z_{K(2)} + z_{r(2)} + z_f}$	$\frac{-I_{j(1)}^{(s)} z_p^{(1s)}}{Z_{p(0)} + z_{rj(0)} + z_f}$
B、C 相断开 ( $\pi$ ) = (10)	$Z_{p(2)} + z_{r(2)} + Z_{p(0)} + z_{rj(0)} + 2z_f$	$I_{K(1)}^{(s)}$	$I_{j(1)}^{(s)}$

表中  $Z_{p(s)} = -z_{rj(s)} Z_{p(s)} / (Z_{p(s)} - z_{rj(s)})$ , 为断口出现后  $r(s)$ ,  $j(s)$  端口的等值阻抗。

根据图 1, 图 2, 由 KCL 定律可得注入  $(s)$  序原网  $r(s)$ ,  $j(s)$  端口电流的故障分量为

$$I_{r(1)}^{(s)} = -I_{j(1)}^{(s)} (Z_p^{(s)} + z_f) / z_{r(1)} \quad (17)$$

$$I_{j(1)}^{(s)} = -I_{r(1)}^{(s)} Z_{p(s)} / Z_{p(s)}, \quad (s) = (0), (2) \quad (18)$$

### 3 非对称断相状态电流电压分布的计算

#### 3.1 断相状态电流电压分布的统一算法

$(s)$  序原网无源状态下对  $I_{r(1)}^{(s)}$  的响应称为故障分量, 根据线性网络特性和  $(s)$  序网节点方程, 可得各序网节点电压的故障分量  $V_{f(s)}^{(s)}$ , 支路电流故障分量  $I_{f(s)}^{(s)}$  分别为

$$V_{f(s)}^{(s)} = I_{f(s)}^{(s)} V_{f(s)}^{(s)} \quad (19)$$

$$V_{f(s)}^{(s)} = V_{f(s)}^{(s)} = I_{f(s)}^{(s)} V_{f(s)}^{(s)}, \quad (s) = (0), (2) \quad (20)$$

$$I_{f(s)}^{(s)} = I_{f(s)}^{(s)} I_{f(s)}^{(s)} \quad (21)$$

$$I_{f(s)}^{(s)} = I_{f(s)}^{(s)} = I_{f(s)}^{(s)} I_{f(s)}^{(s)}, \quad (s) = (0), (2) \quad (22)$$

根据迭加原理, 可得正序网节点电压与支路电流为

$$V_{f(1)}^{(s)} = V_{f(1)}^{(s)} + V_{f(1)}^{(s)} \quad (23)$$

$$I_{f(1)}^{(s)} = I_{f(1)}^{(s)} + I_{f(1)}^{(s)} \quad (24)$$

由图 1, 图 2, 可得新增节点  $f(s)$ ,  $t(s)$  的节点电压为

$$\dot{V}_{f(s)}^{(s)} = \dot{V}_{f(s)}^{(s)} + I_{f(s)}^{(s)} \cdot a z_{rj(s)} \quad (25)$$

$$\dot{V}_{t(s)}^{(s)} = \dot{V}_{f(s)}^{(s)} - I_{f(s)}^{(s)} \cdot (1 - a) z_{rj(s)} \quad (26)$$

#### 3.2 两种非对称断相故障的快速互换计算

在  $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ ,  $Z_f = 0$  的条件下, 对于 A 相断开, 由表 1 及式(17), 式(18) 可得

$$I_{r(1)}^{(s)} = I_{r(1)}^{(s)} \quad (27)$$

上式表明

$$\dot{V}_{f(1)}^{(s)} = \dot{V}_{f(1)}^{(s)} \quad (28)$$

$$I_{f(1)}^{(s)} = I_{f(1)}^{(s)} \quad (29)$$

据此, 可进一步减少 A 相断开的计算量。

由线性网络特性可知, 系统在同一状态下, 电压电流故障分量与  $I_{r(1)}^{(s)}$  成正比。因此, 只要

计算出两种不对称断相的任一种,利用同序断口电流比例系数即可快速算出另一种。

在  $Z_{(1)} = 2Z_{(2)}$  的条件下,令

$$K = (Z_{r(0)} + z_{r(0)} + z_f) / Z_{r(2)} + z_{r(0)} + z_f \quad (30)$$

由式(17)~(18)及表1,可得同序口电流比例系数为

$$K(0) = I_{f(0)}^{(1)} / I_{f(0)}^{(2)} = I_{f(0)}^{(1')} / I_{f(0)}^{(2')} = \frac{2 + K}{1 + 2K} \quad (31)$$

$$K(2) = I_{f(2)}^{(1)} / I_{f(2)}^{(2)} = I_{f(2)}^{(1')} / I_{f(2)}^{(2')} = K \cdot K(0) \quad (32)$$

$$K(1) = I_{f(1)}^{(1)} / I_{f(1)}^{(2)} = -K' K(0)(1 + K) \quad (33)$$

式中  $K' = (Z_{r(1)} + Z_f) / (Z_{r(2)} + Z_f)$ ,若  $Z_f = 0$ ,则有

$$K(1) = -K(2) / (1 + K) \quad (34)$$

因此,可得两种断相状态下电气量值的关系式为

$$V_{(3)}^{(2)} = I_{(3)}^{(2)} + V^{(1)} / K_{(1)} \quad (35)$$

$$V_{(3)}^{(2)} = V_{(3)}^{(1)} = I_{(3)}^{(1)} / K_{(s)}, \quad (s) = (0), (2) \quad (36)$$

$$I_{M(1)}^{(2)} = I_{M(1)}^{(1)} + I_{M(2)}^{(1)} / K_{(1)} \quad (37)$$

$$I_{M(s)}^{(2)} = I_{M(s)}^{(1)} = K_{(s)}, \quad (s) = (0), (2) \quad (38)$$

### 4 数字算例

某系统正、负序网阻抗参数相同,正、零序网如图3所示,已知其  $Z_{(1)}$ 、 $Z_{(0)}$ 、 $I_{(1)}$ ,若去掉2-3支路,同时在支中3-1端部①处分别出现两相及一相完全断开时( $z_f = 0$ ),计算各序网节点电压。

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = j \begin{bmatrix} 0.17685 & 0.15049 & 0.13073 & 0.09909 \\ 0.15049 & 0.20120 & 0.14851 & 0.11257 \\ 0.13073 & 0.14851 & 0.16184 & 0.12267 \\ 0.09909 & 0.11257 & 0.12267 & 0.13884 \end{bmatrix}$$

$$Z_{(0)} = j \begin{bmatrix} 0.11881 & 0.08495 & 0.07424 & 0.01806 \\ 0.08495 & 0.18609 & 0.11266 & 0.02740 \\ 0.07424 & 0.11266 & 0.16091 & 0.03914 \\ 0.01806 & 0.02740 & 0.03914 & 0.07574 \end{bmatrix}$$

$$I_{(1)} = \begin{bmatrix} -j2.8325 \\ 0 \\ 0 \\ -j5.6992 \end{bmatrix}$$

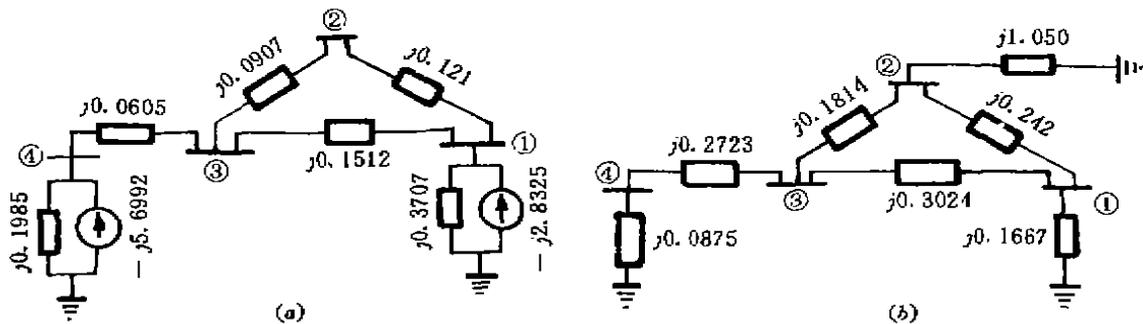


图3 正序网(a)与零序网(b)

根据题意,分别由式(3)、(5)、(2)、(8)、(10A),可得

$$I_{(0)}^* = [-1 \ 0 \ 1 \ 0]^T, Z_{c(0)} = -Z_{23(0)}, I_{c(1)} = I_{c(2)} = I_{23(1)} = 1.34076$$

$$I_{c(0)} = I_{23(0)} = 0.98727, I_{(0)}^* = [-1 \ -0.98729 \ 1.9872 \ 0]^T$$

$$I_{(1)}^* = I_{(2)}^* = [-1 \ -1.34076 \ 2.34076 \ 0]^T$$

$$V_{(0)}^* = j[-0.05514 \ -0.04479 \ 0.13431 \ 0.03267]^T$$

$$V_{(1)}^* = V_{(2)}^* = j[-0.07261 \ -0.07261 \ 0.04898 \ 0.03712]^T$$

$$Z_{p(0)} = j0.18945, Z_{p(1)} = Z_{p(2)} = j0.12159$$

$$Z'_{p(0)} = j0.50718, Z'_{p(1)} = Z'_{p(2)} = j0.62089$$

分别根据式(5)、(2)、(12)、(16),可得

$$I_{23(1)}^* = -j0.06449, I_{(1)}^* = j[-2.8325 \ 0.06449 \ -0.06449 \ -5.6992]^T$$

$$V_{(1)}^* = [1.06440 \ 1.06440 \ 1.07027 \ 1.07260]^T$$

$$V'_{p(1)} = 0.00587, V'_{c(1)} = 0.02997$$

由表(1),式(15)、(17)~(20)、(23),得

$$Z_{p(0)}^{(1)} = j0.3938, I_{(0)}^{(1)} = -j0.03355, I_{(1)}^{(1)} = I_{(2)}^{(1)} = -j0.06712$$

$$V_{(0)}^{(1)} = [-0.00185 \ -0.00151 \ 0.00451 \ 0.00109]^T$$

$$V_{(1)}^{(1)} = V_{(2)}^{(1)} = [-0.00487 \ -0.00487 \ 0.00328 \ 0.00248]^T$$

$$V_{(1)}^{(1)} = [1.0595 \ 1.0595 \ 1.0736 \ 1.0751]^T$$

根据式(30)~(36),得

$$K = 1.04856, K_{(0)} = -0.98432, K_{(2)} = -1.03212, K_{(1)} = 0.50383$$

$$V_{(0)}^{(2)} = [0.00188 \ 0.00153 \ -0.00458 \ -0.0011]^T$$

$$V_{(2)}^{(2)} = [0.00472 \ 0.00472 \ -0.00318 \ -0.00241]^T$$

$$V_{(1)}^{(2)} = [-0.00967 \ -0.00967 \ -0.00652 \ 0.00494]^T$$

$$V_{(1)}^{(2)} = [1.05473 \ 1.05473 \ 1.07679 \ 1.07754]^T$$

以上结果与惯用算法所得结果相同。

## 5 结 论

本文提出的变结构与变参数电力系统非对称断相状态的新算法,由于综合采用了修正节点电流源与断相口等值参数,既避免了修改各序网节点阻抗或导纳矩阵,且比现有单一修正节点阻抗(导纳)矩阵或节点电流源的计算法显著地减少了计算量,能正确算出正序电流电压的正常分量与故障分量。在系统同一运行方式下,能进行同一位置两种非对称断相状态电气量值的快速互换计算。本方法还具有算法统一、数模简明、物理意义清晰、易于掌握等优点,用于不对称断相的故障电气量值计算尤为有效。

## 参 考 文 献

- 1 米麟书,陈刚,刘芳宁. 变结构与变参数大型电力系统非对称断相故障电气量的快速计算. 电力系统自动化,1992,(3):7~14
- 2 米麟书,刘芳宁. 电力系统故障的计算机辅助分析. 重庆:重庆大学出版社,1992