

# 改进的不对称电力系统故障计算方法

唐宏丹<sup>1</sup>, 孙辉<sup>1</sup>, 谈晓魏<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学电气工程及应用电子技术系, 辽宁 大连 116024; 2 华能大连电厂, 辽宁 大连 116100)

摘要: 针对高压电网中三相不对称线路的大量出现, 传统的对称分量法及其序网连接失效的问题, 提出了把电网分块成对称部分和不对称部分, 综合应用序分量法和相分量法的改进的故障计算方法。该方法以相分量故障处理方法为依据, 在序坐标下简化对称部分, 等效到其边界节点, 在相坐标下对简化后的网络处理各种简单和复杂故障, 采用多态计算技术, 以矩阵变换代替传统的数值方程的计算, 避免了相分量法计算量大的缺点。用实例验证了这种综合处理方法的优越性。

关键词: 故障计算; 不对称网络; 对称分量; 相分量

中图分类号: TM711; TM74 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)12-0010-03

## 0 引言

故障计算是电力系统的一项基本计算。完全基于对称分量法的常规故障计算方法<sup>[1]</sup>, 在三相参数对称电力系统故障计算中, 因对称元件在对称分量坐标系中可以解耦, 即各序网之间不存在耦合关系, 有着良好的计算效率。可是近年来出现的超高压输电系统, 由于绝缘和技术方面的原因, 500 kV及以上超高压输电线路难以换位, 三相参数明显不对称, 序分量法失效, 分析不对称电力系统中的各种故障, 常采用相分量法<sup>[2~5]</sup>。相分量法比较直观但数学模型复杂、计算量较大, 为克服相分量法的缺点, 本文提出了不对称电力系统故障分析的对称分量法与相分量法结合的分块算法。

电力系统的对称部分用对称分量法适当简化, 不对称部分因为只是系统的少部分所以用相分量法描述, 为了计算故障端口的任意复杂故障, 我们在故障端口用相分量法来计算, 这就要引入多态相分量法的概念。多态相分量法通过对相分量法的有效改造, 以矩阵计算为手段, 把三相模型统一起来研究, 使三相分析与单相分析有相同的形式, 减小了计算量。

## 1 电力系统三相网络节点方程

### 1.1 大型系统的划分

在对称分量坐标系中, 对称输电线路支路所对应的导纳阵是  $3 \times 3$ 阶对角阵, 不对称输电线路支路对应的导纳阵是  $3 \times 3$ 阶满阵, 而与它们对应的相坐标导纳阵则都是满阵。由此可见, 选用相分量法后, 相坐标系中的节点导纳阵比对称分量坐标系中的更

加稠密, 带来的问题是计算量的增大。而系统中的对称元件占大部分, 我们应充分利用这种导纳阵的稀疏性, 把网络分块简化计算, 对每一个小规模的网络在分割的边界处进行等值计算, 然后再求出分割边界处的协调变量, 最后回带求出各个子网络的内部电量, 得到原来网络的解。对于不对称大电力系统的分块有两种方法: 支路分割法 (branch cutting) 和节点撕裂法 (node tearing)<sup>[6]</sup>。本文借鉴节点撕裂法, 在独立节点数为  $n$  的大型电力系统中, 其中对称部分可以选择部分支路和部分节点将系统分割成  $A, B, \dots, K$  个相互间无电磁联系的子系统, 其中不对称部分元件独立划分成一个或几个子系统  $p, q, \dots, z$ 。确定  $A, B, K$  子系统与不对称部分的边界条件  $bfA, bfB, \dots, bfK$  如图 1。

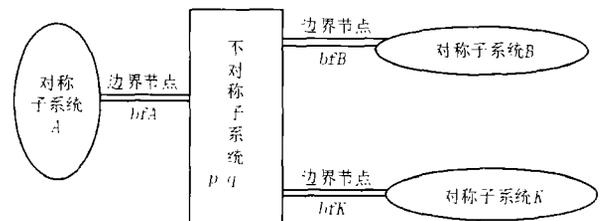


图 1 网络分块法

Fig 1 Piecewise solution in network

### 1.2 对称分量法简化对称部分

把对称子系统在其与不对称部分的边界节点处进行等值, 适当简化对称子系统的节点导纳阵, 具体方法是: 以  $A$  子系统为例: 边界条件是  $bfA$ , 本身  $A$  子系统的节点导纳阵是  $Y_A$ , 因为是可解耦系统, 此处仍用对称分量坐标系, 现在从  $bfA$  看进去, 得到  $Y_A^{bfA}$  是在  $Y_A$  中消除边界节点外的内部节点后得到的边界节点导纳阵, 仍旧是对称分量坐标系中的

元素,我们把它用相序分量法变换到相坐标下表示,得到  $Y_{A,abc}^{jA}$ ,同理可得  $Y_{B,abc}^{jB}, \dots, Y_{K,abc}^{jK}$ ,把它们与不对称部分的相坐标下的节点导纳阵共同组成节点导纳阵,阶数肯定远远小于  $n$ ,接下来的求解的计算量也会小很多。用图示简单表示如图 2。

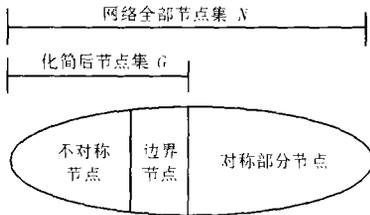


图 2 网络简化图

Fig 2 Simplified network

原系统的节点用集合  $N$  表示,不对称部分和对称部分的边界节点集用  $b^jA$  表示,对称部分的内部节点用  $I$  表示,写出对称部分的边界节点集的等效方程,有

$$\begin{bmatrix} Y_{II} & Y_{Ib^jA} \\ Y_{b^jA I} & Y_{b^jA b^jA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_I \\ U_{b^jA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_I \\ I_{b^jA} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y_{b^jA} = Y_{b^jA b^jA} - Y_{b^jA I} Y_{II}^{-1} Y_{I b^jA}$$

$$I_{b^jA} = I_{b^jA} - Y_{b^jA I} Y_{II}^{-1} I_I$$

式中右侧第二项是内部节点注入电流移至边界节点时的等值电流。

### 1.3 相分量法对故障的计算

利用相分量法对节点导纳阵进行分析,节点的模型通常表示为:  $YV = I$

即:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $Y_{ij}$  ( $i, j$ ) 是节点互导纳,  $Y_{ii}$  是节点自导纳,  $V_i$  是节点电压,  $I_i$  是节点电流,且有

$$Y^{jj} = \begin{bmatrix} Y_{AA}^{jj} & Y_{AB}^{jj} & Y_{AC}^{jj} \\ Y_{BA}^{jj} & Y_{BB}^{jj} & Y_{BC}^{jj} \\ Y_{CA}^{jj} & Y_{CB}^{jj} & Y_{CC}^{jj} \end{bmatrix} V^j = \begin{bmatrix} V_A^j \\ V_B^j \\ V_C^j \end{bmatrix} I^j = \begin{bmatrix} I_A^j \\ I_B^j \\ I_C^j \end{bmatrix} \quad (3)$$

多态相分量法是直接把式子看作是  $n$  阶方程,把  $Y^j, V^j$  这样的矩阵和向量看作是最小的元素处理,直接求解,减小了计算量。

## 2 网络等效方程

### 2.1 节点导纳阵的处理

利用上面的节点处理方法,假设得到的是  $m$  阶

节点导纳阵,为了不破坏式 (2) 的形式,需对故障节点进行处理。利用文献 [7] 的节点处理方法,可以将网络方程重新修改成下列形式:

$$\begin{bmatrix} Y_{00} & Y_{0F} \\ Y_{F0} & Y_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_F \end{bmatrix} \quad (4)$$

$Y_{00}$  为无故障节点网络,  $Y_{FF}$  为故障节点,由于  $I_0$  已知,可以消去  $V_0$  列出如下等效方程  $Y_{FF} V_F = I_F$ , 其中

$$Y_{FF} = Y_{FF} - Y_{F0} Y_{00}^{-1} Y_{0F} \quad (5)$$

$$I_{FF} = I_{FF} - Y_{F0} Y_{00}^{-1} I_0 \quad (6)$$

以上方程只与故障类型和故障数目有关,可以根据故障类型来确定故障分析条件解方程。

### 2.2 短路故障边界条件分析

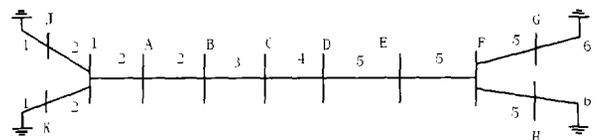
单相接地故障相当于在故障点上叠加一个单相电流源,假设 A 相接地短路,则有:

$$I_{sc} = \begin{bmatrix} I_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于  $V_A^F = 0$ ,可以解得未知数  $I_d, V_B^F, V_C^F$ 。同理可求解两相短路、两相接地短路、三相短路故障。有简洁的公式可以直接利用,见文献 [4],然后回代可求出各节点电压  $V_0$ ,对于不对称的部分,能直接求出各个节点的相坐标下的电压,对于对称部分,求出的是其边界节点的相坐标下的电压,然后用相序变换变换到 012 坐标下。在子系统的可解耦的节点导纳阵中用对称分量法求解子系统内的节点电压。

## 3 算例

下面是一个 11 节点系统接线图,系统中有不对称的部分,线路 BC、CD 为不对称部分,其线路各相的自阻抗、互阻抗如图,对称部分的正序、零序阻抗列在表下。



Z1 1=j0.12	Z1 0=j0.1
Z2.1=j0.1	Z2 0=j0.1
Z3.aa=Z3, bb=Z3, cc=j0.1	Z3.ab=Z3, ba=Z3, bc=Z3, cb=j0.04
Z4.aa=Z4, bb=Z4, cc=j0.1	Z4.ab=Z4, ba=Z4, bc=Z4, cb=j0.04
Z5.1=j0.12	Z5.0=j0.12
Z6.1=j0.15	Z6.0=j0.12
Z3.ac=Z3, ca=j0.02	Z4.ac=Z4, ca=j0.02

图 3 算例系统接线图

Fig 3 Connection of network sample

方法一:设短路点是 C,由式 (5)、(6) 直接用多

态相分量法计算,计算 11 阶矩阵得到,如表 1 所示。

表 1 多态相量法的计算结果  
Tab 1 Results of polymorphic phase component method

$Y_{FF}$ (等效故障节点导纳阵)	$I_{FF}$ (等效故障节点电流)
- 4 622 4 - 0 000 0i 0 139 0 + 0 000 0i 0 371 5 + 0 000 0i 0 371 5 - 0 000 0i 0 139 0 + 0 000 0i - 4 622 4 - 0 000 0i	0 371 5 + 0 000 0i 8 424 6 + 0 348 2i - 4 648 2 - 0 000 0i - 4 335 2 - 7 508 8i 0 371 5 - 0 000 0i - 3 910 8 + 7 470 0i

方法二:把网络分成两个对称部分和一个不对称部分,其中的对称部分 A 是线路 II、IK、A I AB 组成,与不对称部分的边界节点是  $b\beta A$ ,对称部分 B 是线路 DE、EF、FG、FH 组成,与不对称部分的边界节点是  $b\beta B$ 。把对称部分 A 在序坐标下化简到边界节点  $b\beta A$  上,做相序变换得,如表 2 所示。

表 2 对称部分 A 的化简结果  
Tab 2 Simplified result of symmetrical part A

$Y_{b\beta A}$ (等效边界节点导纳阵)	$I_{abcb\beta A}$ (等效边界节点电流)
- 15 193 3 - 0 000 0i 0 532 3 + 0 000 0i 4 509 5 + 0 000 0i 4 509 5 - 0 000 0i 0 532 3 + 0 000 0i - 15 193 3 - 0 000 0i	4 509 5 + 0 000 0i 5 643 1 + 0 000 0i - 16 897 8 - 0 000 0i - 2 821 6 - 4 887 1i 4 509 5 - 0 000 0i - 2 821 6 + 4 887 1i

同理得  $Y_{b\beta B}$ ,  $I_{abcb\beta B}$ ,如表 3。

表 3 对称部分 B 的化简结果  
Tab 3 Simplified result of symmetrical part B

$Y_{b\beta B}$ (等效边界节点导纳阵)	$I_{abcb\beta B}$ (等效边界节点电流)
- 14 634 8 - 0 000 0i 0 531 3 + 0 000 0i 4 508 6 + 0 000 0i 4 508 6 - 0 000 0i 0 531 3 + 0 000 0i - 14 634 8 - 0 000 0i	4 508 6 + 0 000 0i 4 535 2 + 0 000 0i - 16 339 3 - 0 000 0i - 2 267 6 - 3 927 6i 4 508 6 - 0 000 0i - 2 267 6 + 3 927 6i

由上面的计算结果构造 C 点短路时的故障方

程得到 
$$\begin{bmatrix} Y_{00} & Y_{0F} \\ Y_{F0} & Y_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_F \end{bmatrix}$$
,再依据式 (5)、(6)算

出降低阶数后的矩阵的  $Y_{FF}$ ,  $I_{FF}$ ,见表 4。

表 4 改进方法的计算结果

Tab 4 Result of amended method

$Y_{FF}$ (等效故障节点导纳阵)	$I_{FF}$ (等效故障节点电流)
- 4 622 4 - 0 000 0i 0 139 0 + 0 000 0i 0 371 5 + 0 000 0i 0 371 5 - 0 000 0i 0 139 0 + 0 000 0i - 4 622 4 - 0 000 0i	0 371 5 + 0 000 0i 8 424 6 + 0 348 2i - 4 648 2 - 0 000 0i - 4 335 2 - 7 508 8i 0 371 5 - 0 000 0i - 3 910 8 + 7 470 0i

看出两种方法得到的  $Y_{FF}$ ,  $I_{FF}$  是相同的,所以

最终结果相同,用第二种方法的矩阵阶数只有 3 阶,小于第一种方法的 11 阶矩阵,在大规模电力系统计算时,节约的时间会很明显。

### 4 结论

分析表明,序分量法充分利用了对称元件的可解耦性,用稀疏技术可以快速的简化矩阵,相分量法能灵活方便的处理各种故障,把它们结合,再应用多态相分量法,可以降低节点导纳阵的阶数,简化大规模电力系统的故障计算,在电力系统故障分析领域有较好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 西安交通大学,等. 电力系统计算 [M]. 北京:水利电力出版社,1979.  
Xi an Jiaotong University, et al Calculation in Power System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1979.
- [2] Han Z X. Generalized Method of Analysis of Simultaneous Faults in Electric Power System [J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101 (10): 3933-3942
- [3] Roy L. Exact Calculation of Simultaneous Faults Involving Open-conductors and Line-to-ground Short Circuits on Inherently Unbalanced Power System [J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101 (8): 2738-2746
- [4] 姜彤. 基于对称分量模型的电力系统短路故障计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (2): 50-53.  
JIANG Tong A New Method of Power System Fault Calculation Based on Symmetrical Components [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (2): 50-53.
- [5] He W H. Unbalanced Short-circuit Calculation by Phase Coordinates [J]. IEEE on PD, 1995, (2): 744-748
- [6] 张伯明. 高等电力网络分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 1996.  
ZHANG Bo-ming Advanced Power System Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996
- [7] 姜彤. 电力系统多态相分量法的故障分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33 (4): 505-507.  
JIANG Tong Fault Analysis of Polymorphic Phase Component in Electric Power System [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33 (4): 505-507.

收稿日期: 2004-09-07; 修回日期: 2005-01-12

作者简介:

唐宏丹 (1975 - ),女,硕士研究生,目前研究方向是电力系统继电保护; E-mail: thiserror1025@sina.com

(下转第 16 页 continued on page 16)

- [4] 张尧,王琴,宋文南,等. 树状网的潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 217-220  
ZHANG Yao, WANG Qin, SONG Wen-nan, et al A Load Flow Algorithm for Radial Distribution Power Networks[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 217-220
- [5] Ghosh S, Das D. Method for Load Flow Solution of Radial Distribution Networks[J]. IEE Proceeding—Gener, Transm and Distrib, 1999, 146(6): 641-648
- [6] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 配电潮流前推回推法的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 116-120  
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. Study on Convergence of Back/Forward Sweep Distribution Power Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 116-120
- [7] Mekhamer S F, Soliman SA, Moustafa M A, et al Load Flow Solution of Radial Distribution Feeders: a New Contribution[J]. Electrical Power & Energy System, 2002, (24): 701-707.
- [8] 李华东, 韩学山, 卢艺, 等. 配电网潮流计算的实用算法[J]. 东北电力学院学报, 1997, 17(1): 57-63  
LI Hua-dong, HAN Xue-shan, LU Yi, et al Load Flow Practical Algorithm in Power Distribution System[J]. Journal Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1997, 17(1): 57-63
- [9] 曹亮, 孔峰, 陈昆薇. 一种配电网的实用潮流算法[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 58-60  
CAO Liang, KONG Feng, CHEN Kun-wei A Practical Algorithm of Load Flow Calculation for Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 58-60

收稿日期: 2004-10-08; 修回日期: 2004-11-23

作者简介:

王 淳(1963 - ),男,博士,副教授,从事电力系统规划,可靠性与电力市场方面的研究。E-mail: cwang\_ncu\_cn@163.com

### A practical algorithm of power flow calculation for radial networks

WANG Chun

(Nanchang University, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** On the basis of analyzing the techniques for power flow calculations of distribution network, this paper presents a new backward/forward sweep power flow algorithm. This algorithm takes power loss and node voltage as parameters, only inputs node name directly without needing the codes of nodes and branches. The algorithm details are discussed. A program is developed according to the proposed algorithm, and the correctness of the proposed algorithm and program is verified by the case.

**Key words:** distribution system; load flow; backward/forward sweep algorithm

(上接第 12 页 continued from page 12)

孙 辉(1964 - ),女,博士,教授,目前研究方向是电力系统分析与控制;

谈晓魏(1964 - ),男,本科,高级工程师,目前研究方向是电力系统继电保护应用。

### An amended fault calculation method in unbalanced power system

TANG Hong-dan<sup>1</sup>, SUN Hui<sup>1</sup>, TAN Xiao-wei<sup>2</sup>

(1. Dalian University of Science & Technology, Dalian 116024, China; 2. Huaneng Dalian Power Plant, Dalian 116100, China)

**Abstract:** With the three-phase unbalanced lines largely appear in the ultra-voltage power system, it is difficult to use the conventional symmetrical method and its sequence network connection technique. This paper presents an improved way to calculate the fault. It separates the network into symmetrical parts and unsymmetrical parts, synthetically uses sequence components and phase components. In the sequence domain, it equals the symmetrical parts to its boundary nodes; in the phase domain, with the polymorphic calculation technique, it deals with all kinds of faults directly without huge calculating work as it is in the conventional phase components method. The example shows the advantages of this improved method.

**Key words:** fault calculation; unbalanced network; symmetrical components; phase components