

# 电力系统故障分析中故障端口开路电压的计算

曹国臣, 李林琳

(东北电力学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 在不修改故障前原网节点阻抗参数矩阵的条件下,研究了电力系统故障分析中横向故障和纵向故障端口开路电压的计算方法。根据横向故障端口开路电压的物理意义和叠加原理,在已知电力系统中各发电机电势幅值和相位角或已知各发电机电势幅值相等、相位角相同的条件下,推导出计算横向故障端口开路电压的方法。根据纵向故障端口开路电压的物理意义、网络等值方法和叠加原理,在已知电力系统内各发电机电势幅值和相位角或已知各发电机电势幅值和断相支路两侧等效电源相位差的条件下,推导出计算纵向故障端口开路电压的方法。文中的计算方法可满足各种情况下电力系统故障分析计算的需要。

**关键词:** 电力系统; 横向故障; 纵向故障; 故障端口; 开路电压

**中图分类号:** TM774 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)15-0001-04

## 0 引言

故障计算是电力系统设计、事故分析、继电保护整定计算及其动作行为分析所需的基本计算。由于对称元件在对称分量坐标下可以解耦处理,基于对称分量法的故障计算方法有着良好的计算速度和计算效率,在工程计算中得到了广泛的应用。基于对称分量法的电力系统故障计算方法,首先以故障端口为边界将故障电力系统分解成无故障对称系统部分和故障边界部分,采用戴维南定理将无故障对称系统部分简化成简单的三序网络方程,然后利用描述故障边界部分的故障端口边界条件将三序网络方程联立求解,得到故障端口电流,进而求得电力系统各节点电压和各支路电流等故障电气量。在无故障对称系统部分简化过程中,需要计算故障端口的开路电压<sup>[1,2]</sup>。如何根据给定的已知条件计算故障端口开路电压关系到故障计算的效率和精度。本文基于线性电路的基本定理和故障端口开路电压的物理意义,研究了在各种已知条件下利用原网节点阻抗参数计算横向故障和纵向故障端口开路电压的方法。

## 1 横向故障端口开路电压的计算

设支路  $i-j$  上距节点  $i$  侧  $a$  百分点处发生短路故障,故障端口为故障点  $d$  和参考节点  $0$ ,见图 1。

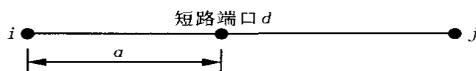


图 1 横向故障示意图

Fig. 1 Short circuit faults

### 1.1 已知各发电机电势幅值和相位角

设电力系统内  $1, 2, \dots, s$  号节点为发电机节点,  $E_k, Z_k$  分别为第  $k$  台发电机的等值电势和内阻抗。将系统内的发电机用在发电机节点注入的电流源来表示,以短路端口  $d$  为边界,可作出横向故障时无故障对称系统部分的计算模型,见图 2。

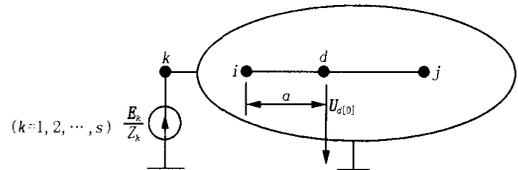


图 2 横向故障无故障系统部分的计算模型

Fig. 2 Calculation model for short circuit faults

由图 2 可见,横向故障端口开路后,对除短路点  $d$  以外的原网节点来讲,网络拓扑结构与正常运行时完全相同。根据故障端口开路电压的物理意义和叠加原理,可利用原网节点阻抗参数求得横向故障端口开路电压为:

$$U_{d(0)} = \sum_{k=1}^s U_d^{(k)} \frac{E_k}{Z_k} \quad (1)$$

$$U_d^{(k)} = U_k^{(d)} = U_j^{(k)} + (1 - \alpha) U_i^{(k)} \quad (2)$$

式中:  $U_j^{(k)}, U_i^{(k)}$  为在原网节点  $k$  注入单位电流时节点  $j$  和节点  $i$  的电压。如果不计量纲关系(以下相同),其数值分别等于原网节点阻抗参数矩阵中第  $k$  行第  $j$  列和第  $i$  列元素  $Z_{kj}$  和  $Z_{ki}$ 。

在式(2)中,令  $\alpha = 0$  或  $1$  即得到节点短路时短路端口开路电压的计算公式。

### 1.2 已知各发电机电势幅值相等、相位角相同

在工程计算中,为简化短路故障计算,通常假设

故障前系统内的各发电机电势幅值相等、相位角相同。在这种假设条件下,故障前电力系统处于空载运行,横向故障端口开路电压就等于电源电势,即:

$$U_{d|0j} = E \quad (3)$$

## 2 纵向故障端口开路电压的计算

设支路  $i-j$  上距节点  $i$  侧百分点处发生断相故障,纵向故障端口为  $i$  和  $j$ ,如图 3 所示。

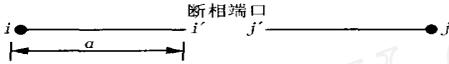


图 3 纵向故障示意图

Fig. 3 Open conductor faults

### 2.1 已知各发电机电势幅值和相位角

设电力系统内  $1, 2, \dots, s$  号节点为发电机节点,  $E_k, Z_k$  分别为第  $k$  台发电机的等值电势和内阻抗。将系统内的发电机用在发电机节点注入的电流源来表示,以断相故障端口  $i, j$  为边界,可作出纵向故障时无故障对称系统部分的计算模型,见图 4。

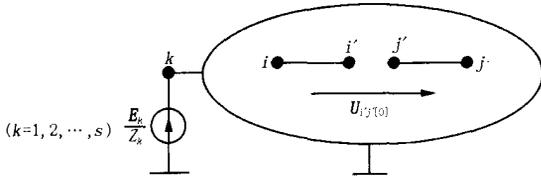


图 4 纵向故障无故障系统部分的计算模型

Fig. 4 Calculation model for open conductor faults

由图 4 可见,纵向故障端口开路后,对除新增节点  $i, j$  以外的原网节点来讲,网络拓扑结构的变化相当于在原网中切除断相故障支路  $i-j$ 。根据故障端口开路电压的物理意义和叠加原理,可利用切除支路  $i-j$  后的网络节点阻抗参数求得断相故障端口的开路电压为:

$$U_{ij|0j} = U_{ij|0j} = \sum_{k=1}^s (U_i^{(k)} - U_j^{(k)}) \frac{E_k}{Z_k} \quad (4)$$

式中:  $U_i^{(k)}, U_j^{(k)}$  分别为从原网中切除断相支路  $i-j$  后在节点  $k$  注入单位电流时节点  $i$  或节点  $j$  的电压,其数值大小等于切除支路  $i-j$  后的节点阻抗参数矩阵中第  $k$  行第  $i$  列元素  $Z_{ki}$  或第  $j$  列元素  $Z_{kj}$ 。

在计算纵向故障端口开路电压时,为避免修改原网节点阻抗参数矩阵,可采用补偿法来模拟切除支路  $i-j$  的网络操作。在节点  $k$  注入单位电流,并在原网节点  $i$  和  $j$  之间并联一条阻抗为  $Z_{i-j}$  的虚拟支路来模拟从原网中切除断相支路  $i-j$ ,便建立起节点电压  $U_m^{(k)}$  ( $m = i, j$ ) 的计算模型,见图 5。

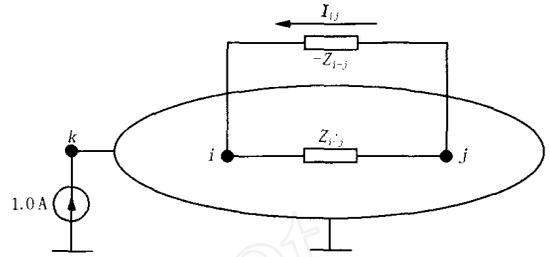


图 5 切除断相支路的模拟方法

Fig. 5 Simulation method for removing open conductor line

根据叠加原理,由图 5 可求得切除断相支路  $i-j$  后在节点  $k$  注入单位电流时任意节点  $m$  的电压为:

$$U_m^{(k)} = U_m^{(k)} + U_m^{(ij)} I_{ij} \quad (m = i, j) \quad (5)$$

式中:  $U_m^{(k)}$  等于原网节点阻抗参数矩阵中第  $k$  行第  $m$  列元素;  $U_m^{(ij)}$  等于原网节点阻抗参数矩阵中第  $m$  行第  $i$  列和第  $j$  列元素之差。

补偿电流  $I_{ij}$  可根据戴维南定理由图 5 求得:

$$I_{ij} = - \frac{U_i^{(k)} - U_j^{(k)}}{U_{ij}^{(ij)} - Z_{i-j}} \quad (6)$$

$$U_{ij}^{(ij)} = Z_{ii} - 2Z_{ij} + Z_{jj} \quad (7)$$

式中:  $Z_{ii}, Z_{ij}$  和  $Z_{jj}$  分别为原网节点阻抗参数矩阵中第  $i$  行第  $i$  列元素、第  $i$  行第  $j$  列元素和第  $j$  行第  $j$  列元素;  $Z_{i-j}$  为支路  $i-j$  的支路阻抗。

### 2.2 已知各发电机电势幅值相等和断相支路两侧等效电源的相位差

利用式(4)计算纵向故障端口开路电压必须已知电力系统内每台发电机电势幅值  $E_k$  和相位角  $\delta_k$ 。尽管通过电力系统暂态稳定计算可求得电力系统内每台发电机的电势幅值  $E_k$  和相位角  $\delta_k$ ,但由于  $E_k$  和  $\delta_k$  随着电力系统网络拓扑结构的变化而变化,在继电保护整定计算等需要进行大量开断操作的场合,利用式(4)计算纵向故障端口开路电压是不实际的。因此,在继电保护整定计算中,为简化纵向故障计算,常常假设电力系统内各发电机电势幅值相等均为额定值  $E$ ,同时给定断相支路两侧等效电源的相位差  $\delta$ ,并采用下式计算纵向故障端口开路电压  $U_{ij|0j}$  的幅值:

$$U_{ij|0j} = 2E \sin \frac{\delta}{2} \quad (8)$$

尽管用式(8)计算纵向故障端口开路电压十分简单,但却存在着明显的缺点: 计算出的纵向故障端口开路电压的幅值与网络结构无关,这显然不符合实际情况,在某些情况下式(8)会导致纵向故障计算结果出现严重的计算误差; 不能计算开路电压的相位角。针对这种情况,需要进一步研究纵

向故障端口开路电压的计算方法。

### 2.2.1 纵向故障端口开路电压幅值的计算

纵向故障端口开路电压的幅值大小与断相支路在电力系统中的位置有关。

#### 1) 当断相支路位于环网之外时

当断相支路位于环网之外时,故障电力系统可简化成图 6 所示的等值电路。

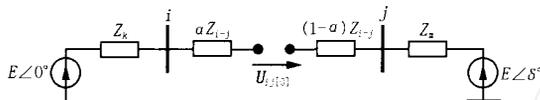


图 6 断相支路位于环网之外时的简化电力系统

Fig. 6 Simplified power system when open conductor line is out of any circle network

由图 6 可得,纵向故障端口开路电压的幅值为:

$$U_{ij(0)} = |E \angle 0^\circ - E \angle \delta| = 2E \sin \frac{\delta}{2} \quad (9)$$

由式(9)可见,当断相支路位于环网之外时,利用式(8)可精确计算出纵向故障端口开路电压的幅值,不存在计算误差问题。

#### 2) 当断相支路位于环网之内时

当断相支路位于环网之内时,大型电力系统只能简化成图 7 所示的等值电路<sup>[3]</sup>。

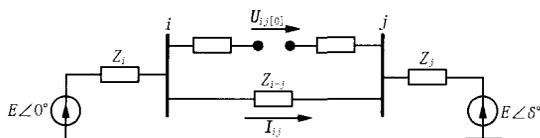


图 7 断相支路位于环网之内时的简化电力系统

Fig. 7 Simplified power system when open conductor line is in circle network

由图 7 可得,纵向故障端口开路电压的幅值为:

$$U_{ij(0)} = |I_{ij} Z_{i-j}| = \left| \frac{Z_{i-j}}{Z_i + Z_{i-j} + Z_j} (E \angle 0^\circ - E \angle \delta) \right| = K_c 2E \sin \frac{\delta}{2} \quad (10)$$

$$K_c = \left| \frac{Z_{i-j}}{Z_i + Z_{i-j} + Z_j} \right| \quad (11)$$

式中:  $K_c$  为考虑网络结构对纵向故障端口开路电压影响所需计及的系数,简称为网络结构系数。由式(11)可见  $0 < K_c < 1$ 。

由式(10)可见,当断相支路位于环网之内时,利用式(8)计算出的纵向故障端口开路电压的幅值存在计算误差,误差的大小视网络结构而定。

从理论上讲,可利用式(11)来计算网络结构系数,但在进行多次断相故障计算的场合,由于式中的

电力系统等值电路参数  $Z_i$ 、 $Z_j$ 、 $Z_{i-j}$  随网络拓扑结构的变化而变化,每改变一次网络拓扑结构都必须重新对电力系统进行化简,计算量很大。现在来研究直接利用电力系统原网节点阻抗参数计算网络结构系数的方法。仅在纵向故障端口注入单位电流将图 7 进行简化,便得到计算网络结构系数的等值电路,见图 8。

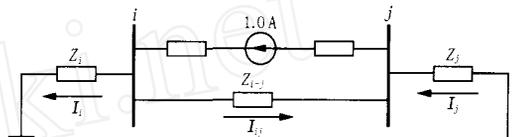


图 8 计算网络结构系数的等值电路

Fig. 8 Equivalent circuit for calculating network structure parameter

由图 8 可得,节点  $i$  和  $j$  之间的电压为:

$$|I_i (Z_i + Z_j)| = 1.0 [(Z_i + Z_j) // Z_{i-j}] \quad (12)$$

由式(12)可求得通过  $i$  侧等效电源中各发电机的电流之和为:

$$I_i = \left| \frac{Z_{i-j}}{Z_i + Z_{i-j} + Z_j} \right| \quad (13)$$

比较式(11)和式(13)可见,网络结构系数正好等于在纵向故障端口注入单位电流时通过等值电路中  $i$  侧等效电源内各发电机电流幅值之和。在电力系统简化之前,很难判断电力系统中哪些发电机将构成电力系统简化后的  $i$  侧等效电源,直接利用式(13)计算网络结构系数有困难。观察图 8,在纵向故障端口注入单位电流时,通过  $i$  侧和  $j$  侧等效电源的电流大小相等方向相反这一结论对含有多台发电机的复杂电网仍然成立,因此,将电力系统内所有发电机支路电流绝对值相加,除以 2 正好等于电网结构系数,即:

$$K_c = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^s |I_k| = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^s \left| \frac{U_k^{(ij)}}{Z_k} \right| \quad (14)$$

式中:  $1, 2, \dots, s$  表示电力系统中发电机节点号;  $U_k^{(ij)}$  为在纵向故障端口注入单位电流时发电机节点  $k$  的电压,可由式(5)求得;  $Z_k$  为电力系统中第  $k$  台发电机的等值内阻抗。

### 2.2.2 纵向故障端口开路电压相位角的计算

由于已知断相支路两侧等效电源的相位差为  $\delta$ ,现在不妨设  $i$  侧电势超前  $j$  侧电势  $\delta$  角,见图 9。由于  $E_i$  和  $E_j$  的幅值相等,图 9 中的三角形为等腰三角形,三角形底边上的高垂直底边且将相位差角  $\delta$  等分。根据这些特点,由图 9,纵向故障端口开路电压的相位角为:

$$ij/0j = 180^\circ - (90^\circ - \frac{\delta}{2}) = 90^\circ + \frac{\delta}{2} \quad (15)$$

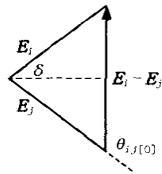


图9 纵向故障端口开路电压相位角的计算

Fig.9 Calculation of phase angle for open conductor faults

### 3 算例

电力系统如图10所示,图中参数为基准容量等于100MVA下的标么值。分别计算, 两侧电源分别为:(a)  $E_A = 1.0 \angle 30^\circ$ ,  $E_D = 1.1 \angle 0^\circ$ ; (b)  $E_A = E_D = 1.0 \angle 0^\circ$ 的条件下,  $d$ 点发生横向故障时故障端口的开路电压; 两侧电源分别为:(a)  $E_A = 1.0 \angle 30^\circ$ ,  $E_D = 1.1 \angle 0^\circ$ ; (b)  $E_A = E_D = 1.0$ , 节点  $B$ 、 $C$  两侧等效电源的相位差  $= 30^\circ$ 的条件下,  $f$ 点发生纵向故障时故障端口的开路电压。

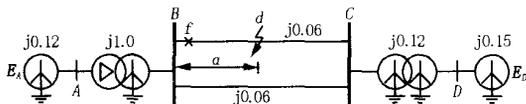


图10 算例电力系统

Fig.10 System sample

计算结果见表1。

表1 算例计算结果

Tab.1 Calculation results of system sample

故障端口开路电压	已知条件(a)		已知条件(b)	
横向故障	1.058	5.44°	1.0	0.00°
纵向故障	0.023	115.08°	0.021	105.00°

### 4 结论

1) 横向故障故障端口开路电压与电力系统内

各发电机的电势幅值和相位角有关,如果假设电力系统内各发电机电势幅值相等、相位角相同,横向故障故障端口开路电压就等于发电机电势;

2) 纵向故障故障端口开路电压与电力系统内各发电机的电势幅值、相位角和网络结构有关,如果假设电力系统内各发电机电势幅值相等均为额定值  $E$ ,同时给定断相支路两侧等效电源的相位差  $\delta$ ,网络结构系数就等于在纵向故障端口注入单位电流时电力系统内所有发电机支路电流之和的  $1/2$ 。

### 参考文献:

- [1] 曹国臣,祝滨(CAO Guo-chen, ZHU Bin). 计及网络操作时电网任意复杂故障的简便计算方法(A Simple Method to Calculate Any Complex Faults in Power System with Variable Structures) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(16): 26-29.
- [2] 曹国臣(CAO Guo-chen). 继电保护整定计算中故障计算的通用方法(A Versatile Method to Calculate Faults for Protective Relaying Setting) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2002, 26(12): 24-29.
- [3] 米麟书,刘芳宁,陈刚(MI Lin-shu, LIU Fang-ning, CHEN Gang). 复杂电网任一线路的双端电源等值电路(A Equivalent Circuit with Double-end Source for Any Transmission Line in Complex Electric Networks) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1992, 16(5): 16-22.

收稿日期: 2003-11-18

作者简介:

曹国臣(1954 - ),男,博士,教授,主要从事电力系统继电保护与安全监控方面的教学和研究工作; E-mail: cgc@2911.net

李林琳(1977 - ),女,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护与安全监控方面的研究工作。

### Calculation of voltage across faulted open port in power system fault analysis

CAO Guo-chen, LI Linlin

(Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

**Abstract:** Without modifying the nodal impedance matrixes of original networks, the method to calculate voltage across faulted open port in power system fault analysis is discussed. Based on the physical meaning of voltage across faulted open port, network equivalent method and the superposition theorem, under the condition that potential values and phase angles of generators have been given or their values are the same, the voltage values across faulted open port in short circuit analysis are obtained. Or given the potential values and phase angles of generators, or the potential values of these generators and the phase angle difference across faulted line, the voltage values are also achieved. The proposed methods can meet the needs of power system analysis under different conditions.

**Key words:** power system; short circuits; open conductors; faulted terminal port; open conductor voltage