

基于故障相关度的广域继电保护故障定位方法

党存禄 张佳宾

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:在确定故障关联域的基础上,提出一种基于故障相关度的故障定位方法。在电力系统正常运行时,列出系统网络对应的矩阵;当系统发生故障后,对各支路的故障相关度进行求解,通过检测并计算即可准确确定故障位置。该方法不仅可以确定故障线路的位置,还可以确定故障元件的位置,不用改变关联系数矩阵,克服了关联系数矩阵在发生故障后不确定的问题,不受过渡电阻和故障类型的影响,计算简单,定位准确。仿真结果表明:该方法可以准确地验证线路不同位置以及不同类型的故障。

关键词:故障关联域;故障定位;继电保护;故障相关度

中图分类号:TM77 文献标识码:A 文章编号:1673-9140(2015)01-0060-07

Fault location method in wide-area protection based on fault correlation degree

DANG Cun-lu ZHANG Jia-bin

(School of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: On the basis of determining a fault correlation region, this paper proposed a fault location method based on fault correlation degree. Under the normal condition of power system, a system network corresponding matrix was listed. When a fault occurred, the fault correlation degree of each branch was solved, a fault location can be accurately located through testing and calculation. This method can not only determine the location of the fault line, but also determine the specific location of the fault components without changing the correlation coefficient matrix. Thus, the uncertainty problem of the correlation coefficient matrix after fault could be overcome. Meanwhile, the proposed method was not influenced by the transition resistance and fault types, and with high accuracy and easy calculation. Simulation results showed that this method can accurately determine fault location and fault type.

Key words: fault correlation region; fault location; power system protection; fault correlation degree

收稿日期:2014-10-15

基金项目:甘肃省自然科学基金(1208RJZA151);甘肃省教育厅硕导基金(1203ZTC025)

通讯作者:党存禄(1964-),男,教授,主要从事工业过程控制、控制理论与控制工程等方面的研究;E-mail:351403278@qq.com

目前,电网结构日益复杂的同时其运行安全问题也变得更为突出,因此需要进一步提高继电保护的可靠性^[1-4]。由于传统继电保护存在的问题比较多,已经不能检测出实际的故障元件位置,因此只能用保护预设的整定值来配合解决这个问题。这样不仅使得动作时间延长、保护整定变得复杂,而且在检测故障线路时变得更加困难,容易造成连锁跳闸,引发大面积停电事故。近几年,基于WAMS的新型继电保护系统随着网络通信和计算机技术的迅速发展而得到了广泛的关注^[5-7]。

如何利用WAMS确定实际故障位置成为了广域继电保护研究中需要解决的关键技术问题。输电线路在电力系统中起着十分重要的作用,如果发生故障,不仅排查起来会比较困难,而且还会威胁到整个系统的安全运行。快速准确地确定故障位置对电网安全运行有着重大意义,可以使得排查时间大大缩短,保证电网正常运行,将损失降到最低限度^[8]。

笔者在确定故障关联域的基础上,提出一种基于故障相关度的故障定位方法。该方法不仅可以确定故障线路的位置,还可以具体确定到故障元件的位置,不用改变关联系数矩阵,解决了网络矩阵在发生故障后不确定的问题,并且过渡电阻和故障类型对其不产生影响,计算相对简单,定位准确。IEEE-9节点系统验证了该方法的可靠性和准确性。

1 确定故障关联域

当电网发生故障时,在忽略系统中非线性器件的情况下可将故障状态网络看成线性网络。系统在出现故障时的状态网络称为故障状态网络,系统在出现故障前的状态网络称为无故障状态网络, U 为其节点电压, I 为支路电流,则

$$\begin{cases} U = Y^{-1}J, \\ I = Y_B A_a^T U. \end{cases} \quad (1)$$

式中 Y 为节点导纳矩阵; Y_B 为系统支路导纳矩阵; A_a 为节点一支路关联矩阵; J 为节点电流。

系统在出现故障后产生变化所引起的暂态过渡过程称为故障暂态网络, U_T 为其节点电压, I_T 为支路电流,则

$$\begin{cases} U_T = Y^{-1}J_T, \\ I_T = Y_B A_a^T U_T. \end{cases} \quad (2)$$

式中 $J_T = J_M - J$, 为暂态电流, J_M 为故障状态网络

节点电流。

系统出现故障后在故障点所产生的状态网络称为故障稳态网络, U_S 为其节点电压, I_S 为支路电流,则

$$\begin{cases} U_S = U_M - U - U_T, \\ I_S = I_M - I - I_T. \end{cases} \quad (3)$$

式中 U_M 为故障状态网络节点电压; I_M 为故障状态网络支路电流。

在广域继电保护运行后对各保护关联域的故障稳态电流 I_D 进行计算,如果 $|I_D| > \varepsilon$, ε 为节点电流所产生偏差的阈值,则可确定故障关联域。

2 故障位置与系统矩阵的关系

节点导纳矩阵 Y 在 n 个节点网络的情况下则为 n 阶方阵,系统的结构和数值决定矩阵中各元素,即

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{ij} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{j1} & \cdots & Y_{ji} & \cdots & Y_{jj} & \cdots & Y_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nj} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

在故障稳态网络中,如果支路 $i-j$ 为故障支路,则在发生故障处故障支路比正常支路多一节点 f ,如图1所示^[9]。

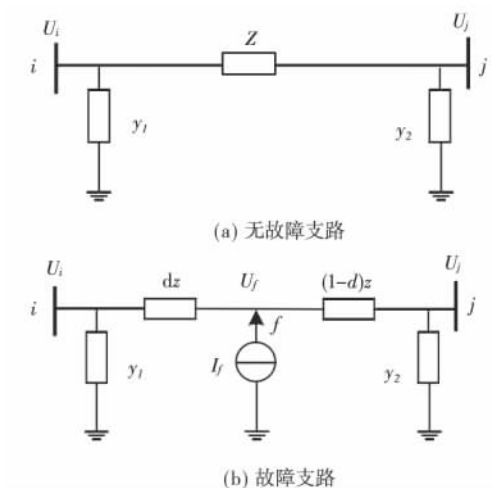


图1 无故障支路与故障支路的对比

Figure 1 Comparison between fault-free line and fault line

系统的节点导纳矩阵 Y 在发生故障时有

$$Y' = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{ij} & \cdots & Y_{in} & Y_{if} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Y_{j1} & \cdots & Y_{ji} & \cdots & Y_{jj} & \cdots & Y_{jn} & Y_{jf} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nj} & \cdots & Y_{nn} & 0 \\ 0 & \cdots & Y_{fi} & \cdots & Y_{fj} & \cdots & 0 & Y_{ff} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由此可以看出,矩阵的阶数及其元素都发生了变化^[10-12]。从图1可以看出,元素 $Y_{ii}, Y_{ij}, Y_{ji}, Y_{jj}$ 以及矩阵 Y' 新增行和列的值都随着故障位置 d 发生变化,若 d 不确定,则系统不能直接求解。虽然可以试着逐一对故障点定位,但不管是采用何种故障分量,其结果都需要对 Y' 进行修改并求逆,由此可得到节点电压和支路电流:

$$\begin{cases} U = Y'^{-1}J, \\ I = (Y_B A_a^T + Y_{B1} A_1^T) Y'^{-1}J. \end{cases} \quad (6)$$

式中 Y_{B1} 为系统支路始端对地支路导纳矩阵; A_1 为节点一对地支路关联矩阵。

然而,对矩阵进行修改并求逆在较大的系统结构中会使得计算量大幅度增加,这样会加大故障定位难度,从而导致定位速度的下降,只有在修改矩阵时的计算量保持不变的情况下,定位速度才会得到相应的提高。

3 故障附加电流分配原理

正常运行时列出系统网络对应的矩阵,当系统发生故障后,对各支路的故障相关度进行求解,通过检测并计算即可准确定位故障位置。将故障状态网络看成线性网络^[13],传输线路采用 π 型等值电路^[14-15],故障支路如图2所示, y_1, y_2 为导纳, z 为阻抗, α 为 K_1 到 f 点与故障支路的距离之比,其节点电压方程为

$$\begin{cases} \left(y_1 + \frac{1}{\alpha z}\right)U_{K1} - \frac{1}{\alpha z}U_f = I_{K1}, \\ \left(y_2 + \frac{1}{(1-\alpha)z}\right)U_{K2} - \frac{1}{(1-\alpha)z}U_f = I_{K2}, \\ -\frac{1}{\alpha z}U_{K1} - \frac{1}{(1-\alpha)z}U_{K2} + \left(\frac{1}{\alpha z} + \frac{1}{(1-\alpha)z}\right)U_f = I_f. \end{cases} \quad (7)$$

式中 I_f 为故障电流; U_f 为故障电压; I_{K1}, I_{K2} 均为故障支路电流。消去 U_f ,化为矩阵形式,得到

$$\begin{bmatrix} y_1 + \frac{1}{z} & -\frac{1}{z} \\ -\frac{1}{z} & y_2 + \frac{1}{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{K1} \\ U_{K2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{K1} + (1-\alpha)I_f \\ I_{K2} + \alpha I_f \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可见,在故障前、后,系统的节点导纳矩阵相同,节点电流由支路电流和故障电流相加得到,并可得出故障等值电路,如图3所示,可以看出,等值电路对系统的节点导纳矩阵不产生影响,使得计算量大大减少。

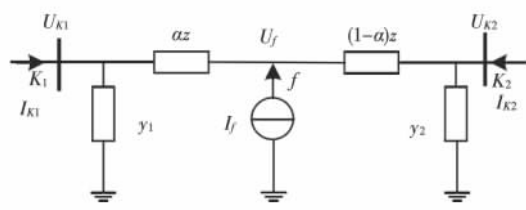


图2 故障支路

Figure 2 Fault line

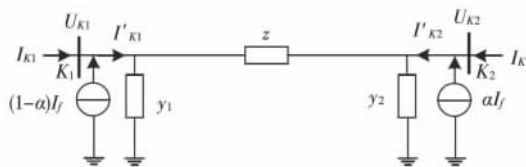


图3 故障等值电路

Figure 3 Fault equivalent circuit

4 故障相关度的定位方法

根据图3,可得故障时的节点电压为

$$U = Y^{-1}J \quad (9)$$

支路始端电流^[16-18]为

$$I' = (Y_B A_a^T + Y_{B1} A_1^T) Y^{-1}J. \quad (10)$$

因为在实际测量与计算中存在误差,故支路始端电流在故障支路中实际为

$$I = (Y_B A_a^T + Y_{B1} A_1^T) Y^{-1}J - (1-\alpha)I_f e_{K1} - \alpha I_f e_{K2}. \quad (11)$$

其中 e_{K1}, e_{K2} 均为所对应故障支路的值为1、其余值为0的列向量。令 $C = (Y_B A_a^T + Y_{B1} A_1^T) Y^{-1}$ 为关联系数矩阵,其在系统中是不可改变的,与系统的结构和数值有关,不受其他因素的影响,在故障前即可算

出^[19]。因为系统的结构和数值在故障前、后保持不变,所以 C 在故障前、后也不发生改变。式(11)可简化为

$$I = CJ - (1 - \alpha)I_f e_{k1} - \alpha I_f e_{k2} \quad (12)$$

因该故障支路只有电流 I_{k1} 和 I_{k2} 分别从支路两端流入,并且系统的数值在故障前、后保持不变,故支路的节点电流为

$$J = [0 \cdots (1 - \alpha)I_f \cdots \alpha I_f \cdots 0] \quad (13)$$

用 C_K 表示矩阵 C 的第 K 列,由式(12)、(13)可得出

$$I = [C_{k1} - e_{k1} \quad C_{k2} - e_{k2}] \begin{bmatrix} 1 - \alpha \\ \alpha \end{bmatrix} I_f = \begin{bmatrix} D_{k1} & D_{k2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 $D_{k1} = C_{k1} - e_{k1}$, $D_{k2} = C_{k2} - e_{k2}$; $g_1 = (1 - \alpha)I_f$, $g_2 = \alpha I_f$,为支路两端节点电流。

式(14)只对故障支路成立,不适用于无故障支路。由于故障位置并不确定,因此,只有对各支路分别求解式(14)才能确定故障位置。故障支路 $b(i - j)$ 如图4所示,假设 i 点到 f 点与支路全长的距离之比为 d ($d \in [0, 1]$) 处发生故障,则

$$I = [C_i - e_i \quad C_j - e_j] \begin{bmatrix} 1 - d \\ d \end{bmatrix} I_f = [D_i \quad D_j] \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

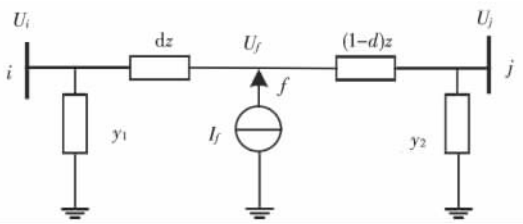


图4 故障支路

Figure 4 Fault line

由于变量个数比支路电流测量个数少,故通过计算式(13)可得到节点等值电流和假设故障位置:

$$G_1 = (D^T D)^{-1} D^T I \quad (16)$$

$$d = \frac{g_2}{g_1 + g_2} \quad (17)$$

如果某条支路的假设故障位置 d 在 $[0, 1]$ 范围内,则该支路为正常支路;反之,则假设该支路为故障支路。将其等值电流 G_1 代入式(15)进行验证,并计算故障电流 I_{cal} ;将支路电流 I 与故障电流 I_{cal} 之间

的距离定义为该支路的故障相关度:

$$R = \frac{\|I_{cal} - I\|_2}{\|I\|_2} \times 100 \quad (18)$$

由于实际测量与计算存在误差,故障相关度不可能为理论值0,通过验证,当故障相关度 R 小于1时即可确定故障支路。故障相关度对于正常支路,其值比较大,从而可确定该假设故障支路和假设故障位置 d 为实际的故障支路和故障位置。

5 仿真分析

笔者采用 IEEE-9 节点系统验证该故障定位方法的可行性,系统中各传输线路均采用 π 型等值电路,IEEE-9 节点系统如图5所示。

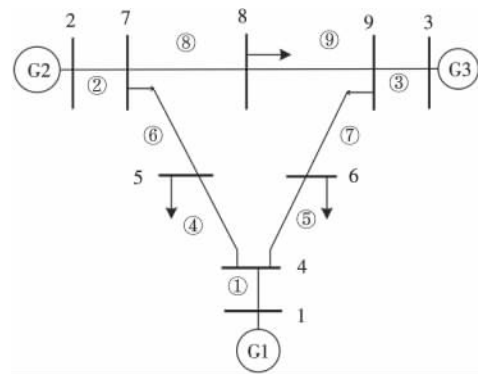


图5 IEEE-9 节点系统

Figure 5 IEEE-9-bus testing system

系统电压等级为 220 kV,线路长度为 100 km。线路的正序和负序参数同为 $R_1 = 0.0357 \Omega/\text{km}$, $X_1 = 0.5077 \Omega/\text{km}$, $B_1 = (3.271 \times 10^{-6}) \text{ S/km}$, $G_1 = 0$; 零序参数为 $R_0 = 0.03631 (\Omega/\text{km})$, $X_0 = 0.1326 \Omega/\text{km}$, $B_0 = (2.322 \times 10^{-6}) \text{ S/km}$, $G_0 = 0$, 采用集中参数模型。发电机 G1: $Z_1 = 0.155 + j5.95 \Omega$, $Z_0 = 1.786 + j7.58 \Omega$; 发电机 G2: $Z_1 = 0.238 + j6.19 \Omega$, $Z_0 = 0.8330 + j5.12 \Omega$; 发电机 G3: $Z_1 = 0.420 + j5.95 \Omega$, $Z_0 = 1.785 + j7.54 \Omega$; 负载 5 β 8: $(600 + j400) / (30 + j20) \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

将接地故障设置在支路⑧40 km 处(图5),计算结果如图6所示,可以看出,故障相关度在支路⑧40 km 处为零,此处为故障位置,其他支路上故障相关度都比较大,即为无故障支路。将短路故障设置在支路⑧60 km 处,计算结果如图7所示。

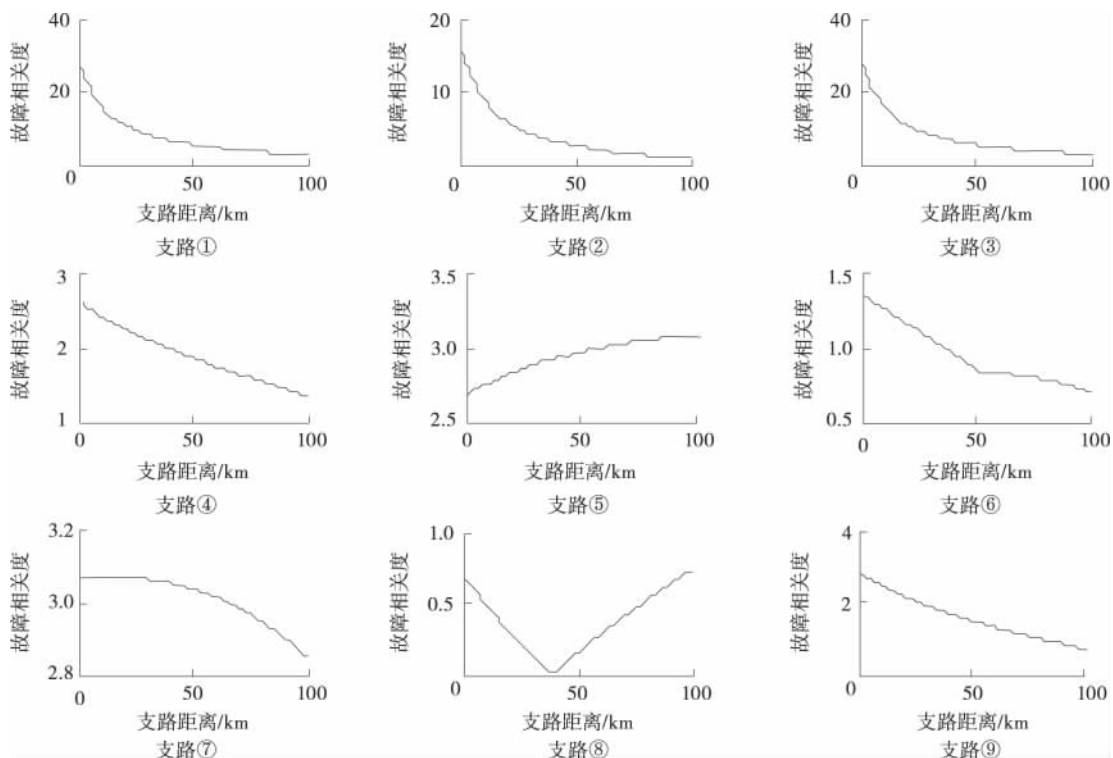


图 6 接地时故障相关度在各支路上的值

Figure 6 Grounding fault correlation degree value in each line

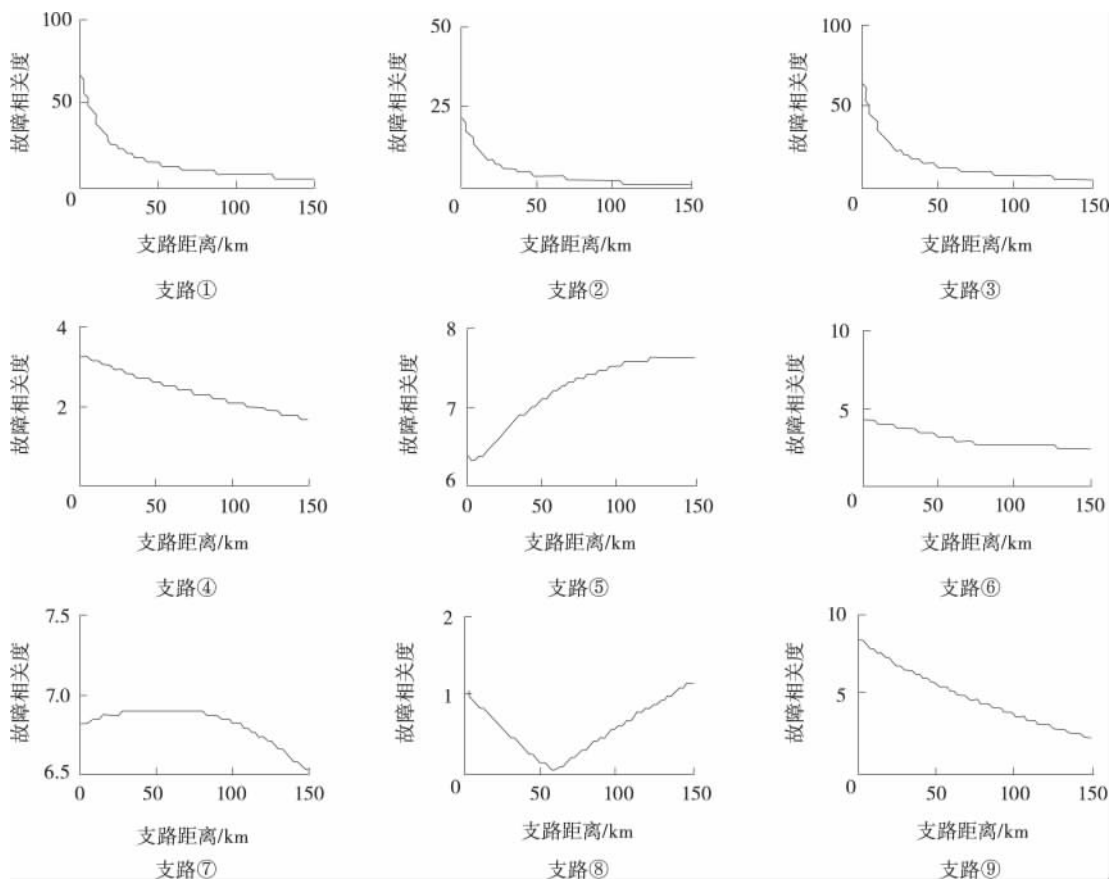


图 7 短路时故障相关度在各支路上的值

Figure 7 Short-circuit fault correlation degree value in each line

与接地故障类似,在支路③60 km处为故障位置,其他支路为无故障支路。对于系统各条支路上发生不同类型的故障,得到的结果相同,从仿真结果可以看出,仅有一个故障点能和故障电流相匹配。将接地和短路故障均设置在支路③60 km处的验证结果如表1所示。

根据假设故障位置,将支路②和⑧定为疑似故障支路,根据表1,支路②不符合条件,可以排除,则支路⑧即为故障支路。对系统各条支路的不同位置设置接地和短路故障,得到的结果相同,由此可见,该文方法能对故障点进行准确的定位。将接地和短路故障分别设置在支路⑧20,40,60,80 km位置处的验证结果如表2所示。

表1 故障相关度

Table 1 Fault correlation degree

故障类型	过渡电阻/ Ω	支路②		支路⑥		支路⑧	
		故障相关度	假设故障位置/ p. u.	故障相关度	假设故障位置/ p. u.	故障相关度	假设故障位置/ p. u.
A相	0	9.62	0.17	0.00	1.42	0.00	0.60
接地	300	7.10	0.28	0.00	1.40	0.00	0.61
BC相	0	9.64	0.18	0.00	1.47	0.00	0.65
短路	300	7.36	0.26	0.00	1.46	0.00	0.62
BC相	0	9.61	0.17	0.00	1.42	0.00	0.61
接地	300	7.09	0.21	0.00	1.41	0.00	0.64
三相	0	9.68	0.18	0.00	1.44	0.00	0.60
短路	300	7.94	0.24	0.00	1.43	0.00	0.63

表2 故障定位结果

Table 2 Fault location results

实际位置/km		20		40		60		80	
故障类型	过渡电阻/ Ω	定位结果/km	误差/%	定位结果/km	误差/%	定位结果/km	误差/%	定位结果/km	误差/%
A相	0	20.08	0.08	40.01	0.01	60.03	0.03	80.07	0.07
接地	300	20.32	0.32	40.28	0.28	60.83	0.83	80.46	0.46
BC相	0	20.06	0.06	40.02	0.02	60.14	0.14	80.01	0.01
短路	300	20.13	0.13	40.53	0.53	60.77	0.77	80.20	0.20
BC相	0	20.09	0.09	40.09	0.09	60.02	0.02	80.08	0.08
接地	300	20.36	0.36	40.41	0.41	60.17	0.17	80.60	0.60
三相	0	20.04	0.04	40.04	0.04	60.08	0.08	80.03	0.03
短路	300	20.51	0.51	40.14	0.14	60.47	0.47	80.34	0.34

6 结语

笔者在确定故障关联域的基础上,提出了一种基于故障相关度的故障定位方法。电力系统在正常运行时,列出系统网络对应的矩阵,当系统发生故障后,对各支路的故障相关度进行求解,通过检测并计算即可准确定位故障位置。该方法不仅可以确定故障线路的位置,还可以具体确定到故障元件的位置,不用改变关联系数矩阵,解决了关联系数矩阵在发生故障后不确定的问题,并且过渡电阻和故障类型对其不产生影响,计算相对简单,定位准确。

参考文献:

- [1] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.
ZHANG Bao-hui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 1-6.
- [2] 张保会, 段建东. 输电线路暂态量保护的研究进展[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(4): 3-12.
ZHANG Bao-hui, DUAN Jian-dong. Development on transient-based protection for transmission lines [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23(4): 3-12.
- [3] 丛伟, 潘贞存, 丁磊, 等. 满足“三道防线”要求的广域

- 保护系统及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 29-33.
- CONG Wei, PAN Zhen-cun, DING Lei, et al. Wide area protection system to defend three different types of power system stability problems and its application [J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 29-33.
- [4] 孙鑫, 张幼明. 智能电网中的广域保护[J]. 东北电力技术, 2011(1): 34-36, 49.
- SUN Xin, ZHANG You-ming. Wide-area protection in smartgrid[J]. Northeast Electric Power Technology, 2011(1): 34-36, 49.
- [5] 李胜芳, 范春菊, 郁惟壖. 基于相量测量的输电线路故障测距新算法[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 28-32.
- LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong. A new phasor measurement based fault location algorithm for transmission lines[J]. Power System Technology, 2004, 28(17): 28-32.
- [6] 张保会, 周良才. 变电站集中式后备保护[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 1-5.
- ZHANG Bao-hui, ZHOU Liang-cai. Centralized substation backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 1-5.
- [7] 吕颖, 张伯明, 吴文传. 基于增广状态估计的广域继电保护算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 12-16.
- LV Ying, ZHANG Bo-ming, WU Wen-chuan. Wide area protection algorithm based on extended state estimation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 12-16.
- [8] 索南加乐, 张悛宁, 齐军, 等. 基于参数识别的时域法双端故障测距原理[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 65-69.
- SUONAN Jia-le, ZHANG Ji-ning, QI Jun, et al. Time domain fault location method based on transmission line parameter identification using two terminals data [J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 65-69.
- [9] 易俊, 周孝信. 电力系统广域保护与控制综述[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 7-13.
- YI Jun, ZHOU Xiao-xin. A survey on power system wide-area protection and control [J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 7-13.
- [10] Yuan Liao. New fault location approach using voltage measurements [C]. Proceedings of IEEE SoutheastCon 2007, Richmond, VA, USA, 2007.
- [11] Yuan Liao. Fault location using sparse current measurements [C]. 39th North American Power Symposium, Las Cruces, NM, USA, 2007.
- [12] Mazlumi K, Abyaneh H A, Sadeghi S H H, et al. Determination of optimal PMU placement for fault-location observability [C]. DRPT2008, Southeast University, Nanjing, China 2008.
- [13] 王艳, 张艳霞, 徐松晓. 基于广域信息的防连锁过载跳闸保护[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 37-41.
- WANG Yan, ZHANG Yan-xia, XU Song-xiao. A protection scheme against chain over-load trip based on wide-area information [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 37-41.
- [14] 鞠平, 张建勇. 电力系统建模基本理论研究综述[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(1): 4-12.
- JU Ping, ZHANG Jian-yong. Basic theory reviews of power system modeling [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(1): 4-12.
- [15] 苗世洪, 刘沛, 林湘宁, 等. 基于数据网的新型广域后备保护系统实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 32-36.
- MIAO Shi-hong, LIU Pei, LIN Xiang-ning, et al. A new type of backup protective system in wide area network based on data network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 32-36.
- [16] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 等. 计及暂态过程的多支路切除潮流转移识别算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 24-30.
- XU Hui-ming, BI Tian-shu, HUANG Shao-feng, et al. Flow transferring identification algorithm for multi-branches removal event with consideration of transient phenomena [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 24-30.
- [17] 秦晓辉, 毕天姝, 杨奇逊. 基于广域同步量测的电力系统扰动识别与定位方法[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 35-42.
- QIN Xiao-hui, BI Tian-shu, YANG Qi-xun. WAMS based power system disturbance identification and location approach [J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 35-42.
- [18] 宋晓娜, 毕天姝, 吴京涛, 等. 基于 WAMS 的电网扰动识别方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 24-28, 73.
- SONG Xiao-na, BI Tian-shu, WU Jing-tao, et al. Study on WAMS based power system disturbance identifying method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 24-28, 73.
- [19] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 等. 基于广域同步测量系统的预防连锁跳闸控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 32-38.
- XU Hui-ming, BI Tian-shu, HUANG Shao-feng, et al. Study on wide area measurement system based control strategy to prevent cascading trips [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 32-38.