

基于相邻线路拓扑关系的距离保护测量回路 隐藏故障诊断方法

高元生¹, 陈强¹, 熊小伏², 周岐杰¹, 郑昌圣²

(1. 国网四川省电力公司达州供电公司, 四川 达州 635000; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 针对距离保护装置测量回路的隐藏故障, 提出了一种基于相邻线路网络拓扑关系的诊断方法。以故障持续时间内线路拓扑关系为基础, 分析了简单网络和带有分支线路网络中不同保护装置测量值之间的约束关系, 并据此建立了用于诊断的判别式组及其相应的门限值。通过对判别式组不同计算结果的组合, 实现了对含有隐藏故障具体装置的定位。针对不同保护装置测量阻抗值不同步的问题, 提出了采用故障稳态时刻测量值的处理方法。利用 PSCAD/EMTDC 对不同短路相角的故障情况进行了仿真验证, 表明了采用故障稳态时刻的测量值能够正确识别出含有隐藏故障的装置。

关键词: 距离保护; 隐藏故障; 拓扑约束; 门限值

Diagnostic method of measuring loop hidden failure of distance protection based on adjacent lines topological relations

GAO Yuansheng¹, CHEN Qiang¹, XIONG Xiaofu², ZHOU Qijie¹, ZHENG Changsheng²

(1. State Grid Sichuan Dazhou Electrical Power Company, Dazhou 635000, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: To solve the distance protection measuring loop hidden failure problem, this paper proposes a diagnostic method based on adjacent lines topological relations. Aiming at simple network and network with branch lines, it analyzes measurement values constraint relations among different protection devices in the fault duration. Constraints discriminants and thresholds are deduced, by substituting measure impedance and composing the results, the purpose of positioning failure device can be achieved. According to the problem of protection measure impedance sync issue, it puts forward a processing method by using measure impedance on faults steady moment. PSCAD/EMTDC is used to simulate failure under different short-circuit phases, which proves device within hidden failure could be recognized by using measure impedance on faults steady moment.

Key words: distance protection; hidden failure; topological constraints; threshold

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0022-08

0 引言

继电保护装置若存在隐藏故障, 可能导致继电保护装置的误动或拒动, 甚至造成连锁故障^[1-3]。为了及时揭示系统高风险的状态, 故障诊断是行之有效的技术手段^[4]。在继电保护诊断过程中, 通过对故障

特征的提取, 能够对已经存在的隐性故障进行定位, 并且对故障发展程度进行判断。

因为隐藏故障具有威胁性大、隐蔽性高的特点, 导致诊断方法存在以下两方面的难点:

(1) 若当前系统所处的压力不足以使隐藏故障暴发, 该隐藏故障将继续存在直到满足其暴发条件, 这种情况将导致系统处于高危状态, 由于监测手段的不完整, 难以利用信号处理或状态识别来揭示这种处于静态的隐性故障。

基金项目: 重庆市科技攻关项目(应用重点)(cstc2012gg-yy jsB90003)

(2) 若当前系统所处的压力能够使隐藏故障暴发, 由于暂态过程计算速度的限制, 一次开关与二次保护信息上传的不及时, 难以在短时间内获悉继电保护装置的动态行为并避免连锁故障的发生。

近年来, 随着继电保护装置信息逐渐开放, 故障录波装置^[5]、广域测量系统^[6-7](WAMS)、继电保护管理信息系统^[8-9](RPMIS)的广泛应用, 已能够实现装置计算数据的及时上传和充分共享^[10-14], 这些技术手段为获取继电保护装置的信息提供了有力支持。文献[5]提出了基于故障录波信息的继电保护内部故障检测, 应用了不同保护装置的录波信息, 但并未提及录波信息不同步的处理方法。文献[15]将继电保护系统工作特性分为静态特性和动态特性, 并提出了基于 WAMS 的静态特性隐藏故障诊断方法, 但在阈值计算方法上尚有优化空间。

相比于静态特性, 分析保护装置内部计算、逻辑的动态特性更为重要, 而保护装置测量值的正确与否则是动态特性的集中体现。处于相邻位置的保护装置, 其测量值应受一次网络拓扑关系^[16-17]约束。因此, 基于拓扑结构对测量值之间的约束关系进行在线校核, 将能够判断测量回路与测量值计算的正确性, 从而识别保护装置测量环节是否存在隐藏故障。

基于上述思想, 本文提出了一种基于相邻线路拓扑关系的距离保护测量回路隐藏故障诊断方法: 首先分析了简单网络故障后距离保护测量值之间受到网络拓扑的约束关系, 再进一步推导了适用于复杂网络保护装置的网路拓扑约束关系, 建立隐藏故障诊断的判别式组; 并提出了相应的阈值确定方法以及不同保护装置测量阻抗不同步的处理方法。

1 基于拓扑关系的距离保护测量性能诊断方法分析

1.1 诊断原理

在相邻线路发生故障的情况下, 非故障线路的继电保护装置暂不动作, 但其内部仍会进行模数转换、数字滤波、测量值计算等过程。

针对图 1 所示的系统, 以距离保护为例, BC 线路故障发生时不仅 BC 线距离保护会进行测量阻抗的计算, AB 线路的距离保护也会启动进行测量阻抗计算, 并进行保护逻辑计算。

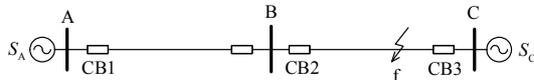


图 1 线路保护示意图

Fig. 1 Schematic diagram of line protection

BC 线 B 侧距离保护测量值与 AB 线路 A 侧距离保护测量值应满足关系式(1)。

$$Z_A = Z_{ab} + Z_B \quad (1)$$

式中: Z_A 、 Z_B 分别是 CB_1 、 CB_2 处的距离保护测量阻抗; Z_{ab} 是反映两套距离保护相互位置关系的线路阻抗。

当距离保护 CB_1 和距离保护 CB_2 的测量回路正常运行且保护测量值计算均正确时, 应满足式(1); 当任意一套保护异常时, 则不满足式(1)。

如图 2 所示, 相邻线路由于受到网络拓扑的约束, 当附近发生开关变位或者短路故障时, 一次电流、电压的变化必然受到拓扑关系的约束。

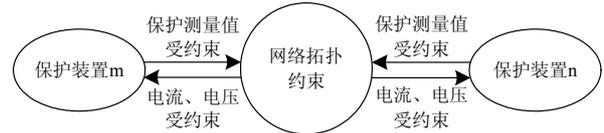


图 2 保护装置受网络拓扑关系约束示意图

Fig. 2 Schematic diagram of protection device constrained by the network topology

故障发生时刻, 对保护装置而言, 其在计算保护测量阻抗时采用的二次电流、电压依然是受到约束的, 经过保护装置测量回路的采集、计算过程, 得到的测量阻抗也会受到网络拓扑关系的约束, 即如同式(2), 其中函数 H 体现了网络拓扑关系的约束。

$$Z_m(u_m, i_m) = H(Z_n(u_n, i_n)) \quad (2)$$

一旦不满足式(2)时, 表示 Z_m 或者 Z_n 对应的保护装置测量回路存在隐藏故障。随着网络拓扑结构的复杂程度不同, 函数 H 的表现形式会有所不同, 但这种约束关系总是存在。因此, 找出这种约束关系并对其进行校验, 可以实现隐藏故障的诊断。

1.2 复杂网络的距离保护测量回路诊断方法

1.2.1 带有助增支路的复杂网络

如图 3 所示, B 母线上带有助增支路 DB, 其网络拓扑属于复杂网络。 CB_1 、 CB_3 保护之间的约束关系必须考虑助增支路的作用。

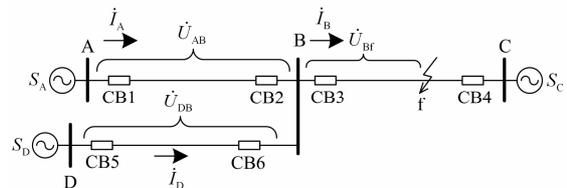


图 3 带有助增支路的示例系统

Fig. 3 Example system with infeed current branch

以接地距离保护为例, 根据定义, 测量阻抗为

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}_\phi}{\dot{I}_\phi + 3KI_{\phi 0}} \quad (3)$$

式中: \dot{U}_ϕ 、 \dot{I}_ϕ 、 $\dot{I}_{\phi 0}$ 分别为故障相电压、故障相电流与零序电流值; K 为零序电流补偿系数。

定义图 3 中 \dot{U}_{AB} 、 \dot{U}_{Bf} 、 \dot{U}_{DB} 分别为 AB, Bf, DB 段电压相量, \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_D 分别为流过各保护安装处的故障相电流, 可列出各段电压方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{I}_{A1}Z_{AB1} + \dot{I}_{A2}Z_{AB2} + \dot{I}_{A0}Z_{AB0} \\ \dot{U}_{Bf} = \dot{I}_{B1}Z_{Bf1} + \dot{I}_{B2}Z_{Bf2} + \dot{I}_{B0}Z_{Bf0} \\ \dot{U}_{DB} = \dot{I}_{D1}Z_{DB1} + \dot{I}_{D2}Z_{DB2} + \dot{I}_{D0}Z_{DB0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: 下标含 1、2、0 的电流分别为流过对应母线的正序、负序、零序电流; 下标含 1、2、0 的阻抗值分别为对应线路段的正序、负序、零序阻抗。

假定线路的正序阻抗等于负序阻抗, 将式(4)代入式(3), 则可得出保护装置 CB_3 的测量阻抗为

$$Z_{3m} = \frac{Z_{Bf1}(\dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{B0}) + \dot{I}_{B0}(Z_{Bf0} - Z_{Bf1})}{\dot{I}_B + 3KI_{B0}} = Z_{Bf1} \quad (5)$$

同理, 假定各段线路的零序补偿系数相等, 可得出距离保护装置 CB_1 与 CB_5 分别为

$$Z_{1m} = Z_{AB1} + Z_{Bf1} \frac{\dot{I}_B + 3KI_{B0}}{\dot{I}_A + 3KI_{A0}} \quad (6)$$

$$Z_{5m} = Z_{DB1} + Z_{Bf1} \frac{\dot{I}_B + 3KI_{B0}}{\dot{I}_D + 3KI_{D0}} \quad (7)$$

式(6)、式(7)可表示为

$$\frac{Z_{1m} - Z_{AB1}}{Z_{3m}} = \frac{\dot{I}_B + 3KI_{B0}}{\dot{I}_A + 3KI_{A0}} \quad (8)$$

$$\frac{Z_{5m} - Z_{DB1}}{Z_{3m}} = \frac{\dot{I}_B + 3KI_{B0}}{\dot{I}_D + 3KI_{D0}} \quad (9)$$

可推导出保护装置 CB_1 、 CB_3 与 CB_5 测量值之间的约束关系为

$$\left| \frac{Z_{3m}}{Z_{1m} - Z_{AB1}} + \frac{Z_{3m}}{Z_{5m} - Z_{DB1}} \right| = 1 \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 当带有助增支路时, 保护之间的测量阻抗关系为非线性函数, 可通过判断上式是否满足来确定有无隐藏故障。

相对而言, 保护装置 CB_2 与 CB_6 虽然不会动作, 但同样会有故障电流流过, 则有测量阻抗值:

$$Z_{2m} = -\frac{\dot{U}_{Bf}}{\dot{I}_A + 3KI_{A0}} = -Z_{Bf1} \frac{\dot{I}_B + 3KI_{B0}}{\dot{I}_A + 3KI_{A0}} \quad (11)$$

$$Z_{6m} = -Z_{Bf1} \frac{\dot{I}_B + 3KI_{B0}}{\dot{I}_D + 3KI_{D0}} \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可推导出保护装置 CB_2 与 CB_6 测量阻抗之间的约束关系为

$$\left| \frac{Z_{1m} + Z_{2m}}{Z_{AB1}} \right| = 1 \quad (13)$$

$$\left| \frac{Z_{5m} + Z_{6m}}{Z_{DB1}} \right| = 1 \quad (14)$$

式(10)、式(13)、式(14)为相邻线路距离保护测量值约束方程。当满足上述方程时, 距离保护测量回路正确; 反之, 当不满足上述约束方程时, 其中的距离保护测量回路存在异常。由于测量回路包含电流、电压互感器等固有误差, 因此实际上即使不存在隐藏故障, 实际计算结果也会存在一定的偏差量 ε_z 。构建考虑了测量回路固有误差的隐藏故障诊断判据为

$$\left| \left| \frac{Z_{3m}}{Z_{1m} - Z_{AB1}} + \frac{Z_{3m}}{Z_{5m} - Z_{DB1}} \right| - 1 \right| < \varepsilon_{Z1} \quad (15)$$

$$\left| \left| \frac{Z_{1m} + Z_{2m}}{Z_{AB1}} \right| - 1 \right| < \varepsilon_{Z2} \quad (16)$$

$$\left| \left| \frac{Z_{5m} + Z_{6m}}{Z_{DB1}} \right| - 1 \right| < \varepsilon_{Z3} \quad (17)$$

如表 1 所示, 通过对比判别式组中不满足约束关系的项, 即可判断含有隐藏故障的具体保护装置。

表 1 隐藏故障诊断结果

Table 1 Diagnostic results of hidden failure				
	式(15)	式(16)	式(17)	诊断结果
情况 1	×	√	√	CB_3
情况 2	√	×	√	CB_2
情况 3	√	√	×	CB_6
情况 4	×	×	√	CB_1
情况 5	√	×	×	CB_2 CB_6
情况 6	×	√	×	CB_5
情况 7	√	√	√	无隐藏故障
情况 8	×	×	×	CB_1 CB_5

注: ×表示不满足该公式, √表示满足该公式。

1.2.2 带有外汲支路的复杂网络

带有外汲支路的示例系统如图 4 所示, 线路 BC 和 BD 为平行双回线, BD 线路流过外汲电流。同样, CB_1 、 CB_3 保护之间的约束关系也会受到外汲电流的影响。此处不考虑两条线路之间的零序互感耦合阻抗。

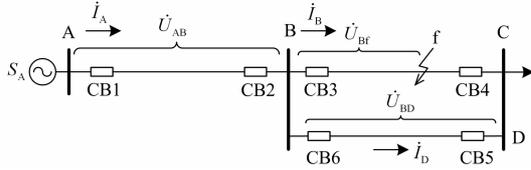


图 4 带有外汲支路的示例系统

Fig. 4 Example system with out-flowing current branch

相比于助增支路, 线路 AB、BC 的电流方向并没有发生变化, 式(5)、式(6)、式(11)仍然成立。而外汲支路 BD 中电流方向的改变, 使得 CB₅ 和 CB₆ 的测量阻抗推导公式有所改变。具体公式为

$$Z_{5m} = Z_{DB1} - Z_{Bf1} \frac{\dot{I}_B + 3KI_{B0}}{\dot{I}_D + 3KI_{D0}} \quad (18)$$

$$Z_{6m} = Z_{Bf1} \frac{\dot{I}_B + 3KI_{B0}}{\dot{I}_D + 3KI_{D0}} \quad (19)$$

结合式(5)、式(6)、式(11), 可以推导出带有外汲支路时, 不同保护装置测量阻抗之间的约束关系为

$$\left| \frac{Z_{3m}}{Z_{1m} - Z_{AB1}} - \frac{Z_{3m}}{Z_{DB1} - Z_{5m}} \right| = 1 \quad (20)$$

$$\left| \frac{Z_{1m} + Z_{2m}}{Z_{AB1}} \right| = 1 \quad (21)$$

$$\left| \frac{Z_{5m} + Z_{6m}}{Z_{DB1}} \right| = 1 \quad (22)$$

分析上述公式可知, 当涉及到多条线路保护装置之间的约束关系时, 由于支路电流方向的不同, 会使得约束关系式有形式上的差别, 如式(10)和式(20)。而对于单条线路两端的保护装置而言, 其约束关系不随外界因素影响而变化, 如式(13)、式(14)和式(21)、式(22)。

2 判据阈值整定

原始的电压、电流在经过互感器后, 其幅值和相位都会带入一定的误差, 误差的大小直接影响到上述判据阈值的大小。

在考虑误差的影响后, 设保护装置的测量电压为

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{m|0} k_u e^{j\delta_u} \quad (23)$$

式中: $\dot{U}_{m|0}$ 为二次侧的电压真实值; k_u 为电压幅值的误差系数; δ_u 为相位误差。

同理, 对测量电流有

$$\dot{I}_m = \dot{I}_{m|0} k_i e^{j\delta_i} \quad (24)$$

式中: $\dot{I}_{m|0}$ 为二次侧的电流真实值; k_i 为电流幅值的误差系数; δ_i 为相位误差。则得到的测量阻抗为

$$Z_m = Z_{m|0} \frac{k_u}{k_i} e^{j(\delta_u - \delta_i)} \quad (25)$$

可见, 考虑误差后会对测量阻抗真实值 $Z_{m|0}$ 的幅值造成 k_u/k_i 倍变化, 对相角造成 $(\delta_u - \delta_i)$ 的偏移。依据电流互感器标准 GB1208-1997 和电压互感器标准 GB1207-1997, 可得关于保护用互感器的误差限值, 如表 2 所示。

表 2 保护用互感器误差限值表

Table 2 Error limit tables of protective CT/PT

电流互感器			电压互感器		
准确级	电流误差	相位差	准确级	电流误差	相位差
5P	±1%	±60'	3P	±3%	±120'
10P	±3%	—	6P	±6%	±240'

考虑对测量阻抗计算精度影响最大的情况, 即选取 5P 级电流互感器(电流幅值误差为±1%, 相位误差为±60')和 6P 级电压互感器(电压幅值误差为±6%, 相位误差为±240')。因此, 互感器对测量阻抗的实际影响为

$$Z_m = Z_{m|0} \frac{1+6\%}{1-1\%} e^{j(240' - (-60'))} = Z_{m|0} (1.067 + j0.093)$$

针对单个保护装置, 其测量阻抗的绝对误差为

$$\Delta Z_m = Z_{m|0} (0.067 + j0.093)$$

在隐藏故障约束判别式的计算过程中, 会代入不同保护装置的测量阻抗值。假设不同保护装置测量阻抗均带有 ΔZ_m 的误差量, 利用误差传递公式^[18]能够将不同保护装置的 ΔZ_m 以合成误差的形式表现出来, 从而能以此确定每个约束判别式的阈值。

针对式(15)中 $G_1 = \frac{Z_{3m}}{Z_{1m} - Z_{AB1}}$ 项, 应用误差传递

公式。首先对 G_1 两边取自然对数:

$$\ln G_1 = \ln Z_{3m} - \ln(Z_{1m} - Z_{AB1})$$

针对各项分别求一阶偏导:

$$\frac{\partial \ln G_1}{\partial Z_{3m}} = \frac{1}{Z_{3m}}, \quad \frac{\partial \ln G_1}{\partial Z_{1m}} = \frac{1}{Z_{1m} - Z_{AB1}}$$

得误差传递公式为

$$\frac{\Delta G_1}{G_1} = \frac{1}{Z_{3m}} \Delta Z_{3m} + \frac{1}{Z_{1m} - Z_{AB1}} \Delta Z_{1m} \quad (26)$$

可得 G_1 项的绝对误差为

$$\Delta G_1 = \frac{G_1}{Z_{3m}} (\Delta Z_{3m} + G_1 \Delta Z_{1m}) \quad (27)$$

针对式(15)中的 $G_2 = \frac{Z_{3m}}{Z_{5m} - Z_{DB1}}$ 项, 有

$$\Delta G_2 = \frac{G_2}{Z_{3m}} (\Delta Z_{3m} + G_2 \Delta Z_{5m}) \quad (28)$$

则式(15)对应的门槛值为

$$\varepsilon_{Z1} = \Delta G_1 + \Delta G_2 \quad (29)$$

针对式(16), 式(17), 其门槛值分别为

$$\varepsilon_{Z2} = \frac{\Delta Z_{1m} + \Delta Z_{2m}}{Z_{AB1}} \quad (30)$$

$$\varepsilon_{Z3} = \frac{\Delta Z_{5m} + \Delta Z_{6m}}{Z_{DB1}} \quad (31)$$

以实际求取门槛值 ε_{Z3} 为例, 考虑互感器误差后, 所获取的测量阻抗值分别为

$$\Delta Z_{5m} = Z_{5m|0} (0.067 + j0.093)$$

$$\Delta Z_{6m} = Z_{6m|0} (0.067 + j0.093)$$

将其代入式(31)得

$$\varepsilon_{Z3} = \left| \frac{Z_{5m|0} + Z_{6m|0}}{Z_{DB1}} \cdot (0.067 + j0.093) \right|$$

由式(14)可知 $\left| \frac{Z_{5m|0} + Z_{6m|0}}{Z_{DB1}} \right|$ 近似为 1, 则实际情况下, 门槛值 ε_{Z3} 约为 0.115。

3 不同保护装置测量阻抗不同步的处理方法

式(1)要求不同保护装置代入计算的测量阻抗为同时刻电压、电流得到的计算值。但实际中因不同保护的阻抗计算方法存在差异, 其测量阻抗的计算耗时会有所不同, 因此, 代入约束判别式的测量阻抗可能并不同步, 对约束判别式的正确性产生影响。

理论上, 在故障持续时间段内, 无论是瞬时阻抗还是故障稳态阻抗, 都应符合约束关系。在故障电流暂态过程, 由于短路电流尚未稳定, 计算所得的测量阻抗一直在变化, 需要在测量阻抗完全同步的前提下, 才能应用约束关系判别式。而在故障电流稳定状态, 不同保护测量阻抗值处于稳定不变的情况, 无论测量阻抗是否同步, 代入约束判别式的测量阻抗均是稳定不变的量。因此, 判别式中可采用故障稳态时的测量值, 以避免不同保护装置测量阻抗的不同步带来的误差。

以图 1 网络的仿真结果为例, 详细阐述获取故障稳态测量值的方法。

仿真结果如图 5 所示, 故障发生时刻 $t_{f1} = 0.2 \text{ s}$, 断路器跳闸时刻 $t_{f2} = 0.3 \text{ s}$, 箭头所指实线表示保护装置 2 测得的故障相电流幅值, 另两条虚线和实线分别表示保护装置 1、2 的测量电抗值, 由于跳闸后故障电流消失, 各个保护装置的测量电抗在 t_{f2} 后会

产生较大的突变。而在跳闸时刻 t_{f2} 前的 3 个采样周期时间内, 不同保护装置的测量阻抗均处于稳定状态。针对保护装置 1 的测量值序列 $\{Z_1(t_i)\}$, 在 $t_i = t_{f2} - 3\Delta t_1$ 时刻 (Δt_1 为保护装置 1 的单个采样周期), 测量阻抗值处于稳定状态, 即可取 $Z_1(t_{f2} - 3\Delta t_1)$ 代入约束关系判别式。

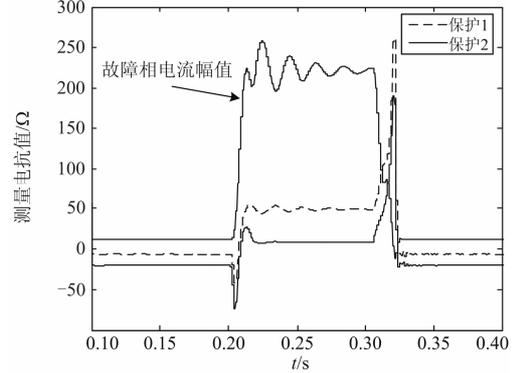


图 5 简单网络仿真结果

Fig. 5 Simulation results of simple network

相应地, 针对保护装置 2 的测量阻抗序列 $\{Z_2(t_j)\}$, 可取稳态测量阻抗为 $Z_2(t_{f2} - 3\Delta t_2)$ (式中 Δt_2 为保护装置 2 的单个采样周期)。

则通过约束关系

$$Z_1(t_{f2} - 3\Delta t_1) = Z_{ab} + Z_2(t_{f2} - 3\Delta t_2) \quad (32)$$

是否成立, 即可诊断保护装置 1、2 是否含有隐藏故障, 从而避免了测量阻抗不同步对约束判别式带来的影响。

4 仿真分析

本文利用 PSCAD/EMTDC 对图 3 所示 220 kV 电压等级的复杂网络进行仿真。线路的参数如下: $Z_{L1} = 0.035 + j0.423 \Omega/\text{km}$, $Z_{L0} = 0.3 + j1.143 \Omega/\text{km}$; 线路 AB、BC、DB 分别长 100 km、100 km、250 km; A 侧系统: $\dot{E}_A = 230 \angle 30^\circ \text{ kV}$, D 侧系统: $\dot{E}_A = 230 \angle 45^\circ \text{ kV}$, C 侧系统: $\dot{E}_A = 220 \angle 0^\circ \text{ kV}$, 电源参数均为: $Z_{S0} = 9.186 + j43.354 \Omega$ 。故障点为金属性 A 相接地故障, 设置在距离 B 侧母线的 20 km 处, 故障持续时间为 0.1 s。以 PSCAD 中的 Random 模块模拟隐藏故障对测量回路带来的干扰。

将 CB_2 内部设置隐藏故障, 并设置短路相角为 0° , 仿真结果如图 6 所示, 自上而下的三个子图中: 无点实线分别代表不含隐藏故障时判别式(10)、式(13)、式(14)的计算结果, 圆点实线分别代表含隐藏故障时三个公式的计算结果。从图中可以看出短路故障发生后, 在故障后 30 ms 内, 为故障电流不稳

定阶段, 必然会令判别式的计算结果产生波动。如图 7 所示, 短路故障后由于衰减直流分量的作用, 短路电流存在一个从暂态向稳态的过渡过程。这种过渡过程在图 6 中即体现为故障发生后短时间内计算结果的波动。

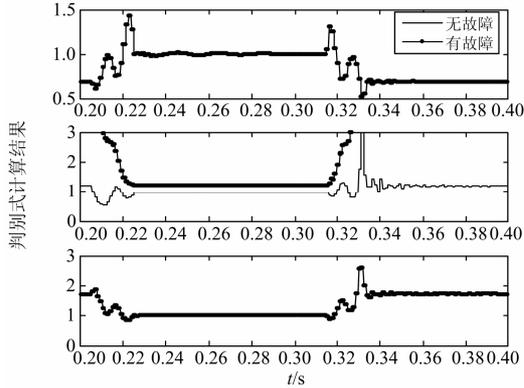


图 6 短路相角为 0° 时判别式组的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of discriminant formulas when the short-circuit phase is 0°

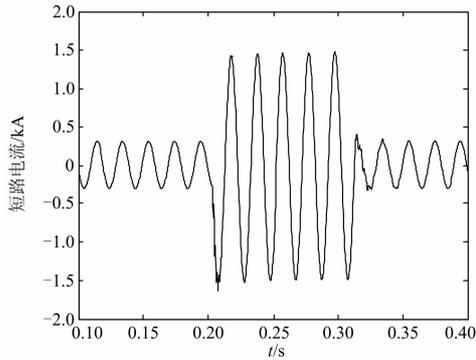


图 7 短路相角为 0° 时流过 CB_2 的短路电流

Fig. 7 Short-circuit current of CB_2 when the short-circuit phase is 0°

在短路相角为 0° 时, 导致暂态过程非常短; 而短路相角为 90° 时的仿真结果如图 8、图 9 所示, 这

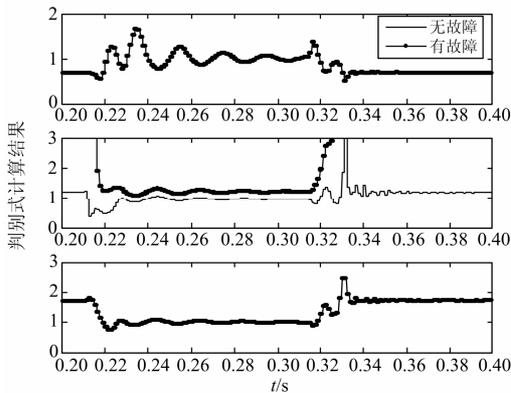


图 8 短路相角为 90° 时判别式组的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of discriminant formulas when the short-circuit phase is 90°

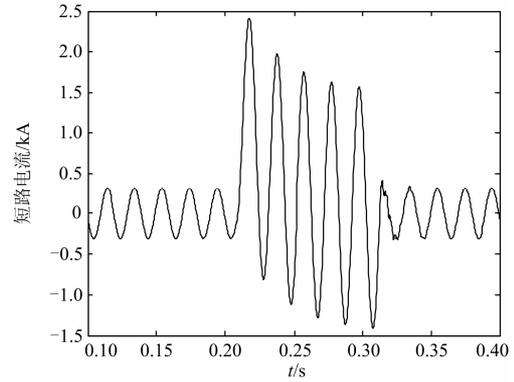


图 9 短路相角为 90° 时流过 CB_2 的短路电流

Fig. 9 Short-circuit current of CB_2 when the short-circuit phase is 90°

种情况下短路电流暂态峰值最大, 且暂态持续时间最长。

在不同短路相角的情况下, 分别计算约束判别式的阈值, 如表 3 所示。

表 3 不同短路相角下约束判别式阈值计算结果

Table 3 Threshold calculation results of constraints discriminant at different short-circuit phase

短路相角/ $^\circ$	ε_{Z1}	ε_{Z2}	ε_{Z3}
0	0.608	0.138	0.114
60	0.632	0.138	0.114
90	0.638	0.138	0.114
120	0.636	0.138	0.114

从 ε_{Z3} 可以看出仿真结果与理论推导值 0.115 相近。将判别式组的计算结果与阈值相比较, 结果如表 4 所示。

从表 4 可知, 在不同短路相角的情况下, 同一约束判别式的计算结果变化不大。这是由于判别式中采用的为故障稳态时的测量值, 受短路电流暂态过程的影响不大。计算结果与表 1 相符, 有隐藏故障的情况均被正确识别出来, 且可判断出含有隐藏故障的保护装置为 CB_2 。

表 4 约束判别式的计算结果

Table 4 Calculation results of constraints discriminant

短路相角/ $^\circ$	判别式(15)		判别式(16)		判别式(17)	
	无故障	有故障	无故障	有故障	无故障	有故障
0	0.005	0.005	0.029	0.206	0.005	0.005
60	0.012	0.012	0.029	0.206	0.004	0.004
90	0.016	0.016	0.029	0.205	0.004	0.004
120	0.016	0.016	0.029	0.206	0.004	0.004

5 结论与展望

保护装置测量回路的隐藏故障是导致事故发生及扩大的一个重要因素。针对其隐蔽性高、防范难度大的特点,本文提出了基于相邻线路网络拓扑关系的诊断方法,通过直接引用装置测量值的方式避开了繁琐耗时的暂态计算过程,并利用由拓扑关系决定的判别式组来判断保护装置是否含有隐藏故障。在判别式阈值计算时,通过误差传递公式将互感器误差进行处理,体现了实际应用中,测量回路含固有误差的本质。此外,利用了保护装置测量阻抗在稳定状态保持不变的性质,解决了保护装置测量值不同步的问题。

单次故障发生所产生的测量值足以检测故障线路以及相邻非故障线路保护装置的测量回路,依据该思路,本文的诊断方法同样可以应用于其他具有此类约束关系的保护。引用测量值的手段也迎合了继电保护装置内部信息共享的发展趋势,为隐藏故障的在线诊断提供了新的途径。

参考文献

- [1] KOEUNYI B, JAMES S. A stochastic study of hidden failures in power system protection[J]. Decision Support Systems, 1999, 24(3-4): 259-268.
- [2] 熊小伏, 蔡伟贤, 周家启, 等. 继电保护隐藏故障造成输电线路连锁跳闸的概率模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 64-68.
XIONG Xiaofu, CAI Weixian, ZHOU Jiaqi, et al. Probabilistic model for transmission lines' cascading trips caused by hidden failures in relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 64-68.
- [3] 许婧, 白晓明. 考虑保护隐藏故障的系统 N-k 故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 108-114.
XU Jing, BAI Xiaoming. Power system N-k contingency analysis in consideration of protection hidden failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 108-114.
- [4] 熊小伏, 陈星田, 郑昌圣, 等. 继电保护系统状态评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 51-58.
XIONG Xiaofu, CHEN Xingtian, ZHENG Changsheng, et al. Overview of research on state evaluation of relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 51-58.
- [5] 孙鑫, 熊小伏, 杨洋. 基于故障录波信息的输电线路继电保护内部故障在线检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 6-10.
SUN Xin, XIONG Xiaofu, YANG Yang. Online detection for transmission lines relay protection's inner failures based on fault information[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 6-10.
- [6] 李婷, 吴敏, 何勇. 计及广域测量系统时滞影响的灵活交流输电系统阻尼控制器多目标设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 227-234.
LI Ting, WU Min, HE Yong. Multi-objective design of FACTS damping controller based on WAMS with signal transmission delay[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 227-234.
- [7] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 179-186.
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-186.
- [8] 薄志谦, 张保会, 董新洲, 等. 保护智能化的发展与智能继电器网络[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 2-12.
BO Zhiqian, ZHANG Baohui, DONG Xinzhou, et al. The development of protection intellectualization and smart relay network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 2-12.
- [9] 陈国炎, 张哲, 尹项根, 等. 基于证据理论融合的广域后备保护新方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 246-255.
CHEN Guoyan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. A new algorithm of wide area backup protection based on evidence theory fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 246-255.
- [10] 王媛, 焦彦军, 马叶芝. 利用本地信息实现新型站域保护方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(8): 60-70.
WANG Yuan, JIAO Yanjun, MA Yezhi. Research on substation-area protection scheme based on local information[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(8): 60-70.
- [11] 邓丰强, 吕飞鹏, 廖小君, 等. 考虑系统运行方式的继电保护在线智能校核[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 71-76.
DENG Fengqiang, LÜ Feipeng, LIAO Xiaojun, et al. Online intelligent verification of relay protection considering system operation mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 71-76.

- [12] 张磐, 张艳霞, 宣文博, 等. 基于智能变电站的继电保护动态特性仿真系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 92-95.
ZHAN Pan, ZHANG Yanxia, XUAN Wenbo, et al. Simulation system for dynamic characteristics of relay protection based on smart substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 92-95.
- [13] 邓丰强, 吕飞鹏. 考虑保护重要度的继电保护定值在线校核[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 85-89.
DENG Fengqiang, LÜ Feipeng. On-line verification of relay protection setting considering protection importance[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(4): 85-89.
- [14] 付贵宾, 李永丽, 陈晓龙, 等. 基于电流突变量的微电网故障区域判定方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(3): 7-13.
FU Guibin, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Fault zone determination method for micro-grid based on current fault component[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(3): 7-13.
- [15] 熊小伏, 刘晓放. 基于 WAMS 的继电保护静态特性监视及其隐藏故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 11-15.
XIONG Xiaofu, LIU Xiaofang. Monitoring of static characteristics and diagnosis of hidden failures in protection system based on WAMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 11-15.
- [16] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 分区广域继电保护的系统结构与故障识别[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 95-103.
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on system architecture and fault identification of zone-division wide area protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 95-103.
- [17] 丁伟, 何奔腾, 王慧芳, 等. 广域继电保护系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 145-155.
DING Wei, HE Benteng, WANG Huifang, et al. Overview of wide-area relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 145-155.
- [18] 张建方. 关于误差的传递公式[J]. 数理统计与应用概率, 1995, 10(3): 57-70.
ZHANG Jianfang. On the formula of error transmission[J]. Mathematical Statistics and Applied Probability, 1995, 10(3): 57-70.

收稿日期: 2014-10-15; 修回日期: 2015-01-12

作者简介:

高元生(1970-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 周金梅)