

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191299

# 基于广域同步数据的就地化保护在线分析方法

宋福海<sup>1</sup>, 翟博龙<sup>2</sup>, 唐志军<sup>2</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

**摘要:** 为了及时准确识别就地化系统中进行误操作的保护装置, 以保障电力系统运行安全, 提出了一种基于广域同步数据的就地化保护决策实时分析方法。根据网络拓扑结构选定测量节点并对就地化保护同步信号进行检测, 基于广域同步数据计算保护指标, 针对过电流保护、距离保护和方向保护建立故障识别函数。基于 EMTP 对一个 38 节点系统进行仿真, 针对四类故障情况计算故障分析函数, 并通过函数计算结果验证保护决策正确性。结果表明, 基于广域同步数据的就地化保护在线分析方法是有效和实用的。该方法能准确识别保护方案中的决策错误。

**关键词:** 就地化保护; 广域同步数据; 故障识别

## On-line analysis method of installation protection based on wide-area synchronous data

SONG Fuhai<sup>1</sup>, ZHAI Bolong<sup>1</sup>, TANG Zhijun<sup>2</sup>

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** To accurately identify, in a timely fashion, a protection device that has been mis-operated in the installation protection system, and in order to ensure the safety of power system operation, a real-time analysis method of installation protection decision based on wide-area synchronous data is proposed. A measurement node is selected according to the network topology and the installation protection synchronization signal is detected. Protection indices are calculated based on the wide-area synchronization data. A fault identification function is established for overcurrent, distance and direction protection. Based on EMTP, a 38-node system is simulated, and a fault analysis function is calculated for the four types of fault conditions, and the correctness of the protection decision is verified by the function calculation result. The results show that the online analysis method of installation protection based on wide-area synchronous data is effective and practical, and the method can accurately identify decision errors in protection schemes.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521304170028) and Science and Technology Project of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. (No. 521304180013).

**Key words:** installation protection; wide area synchronization data; fault identification

## 0 引言

电力系统可通过过电流保护、方向保护和距离保护等多种保护方式来识别电网中的故障。在电力系统受到干扰时, 如果没有识别出保护方案中的错误, 则可能引发级联跳闸的情况, 从而导致停电故障<sup>[1-5]</sup>。就地化保护分散安装在变电站内, 需及时准确识别系统中进行误操作的保护装置。对于继电保护方案而言存在拒动和误动两种错误模式, 拒动即

保护系统无法识别系统中故障情况, 误动是保护区外没有故障信号或跳闸信号时的保护运行<sup>[6-8]</sup>。

通过对运行信号的实时分解, 可以识别出保护方案中的错误, 从而更快启动后备保护或进行闭锁操作。在系统发生扰动时, 会有大量的决策信号被传输到控制中心, 增加实时分析难度<sup>[9-12]</sup>。

WAMS 同步相量技术是广域测量系统的主要组成部分, 可通过相量测量单元提供电力系统不同位置的同步数据。就地化保护可提供基于 GPS 的时间同步数据和状态信号。就地化保护和 WAMS 系统在智能电网领域的广泛应用, 为电网的监测、保护

**基金项目:** 国家电网公司科技项目资助 (521304170028); 国网福建省电力有限公司科技项目资助 (521304180013)

和控制提供了改进方案<sup>[13-17]</sup>。

本文提出了一种电力系统继电保护方案决策信号的实时分析方法。通过广域同步数据支撑, 分析继电保护信号的动态状态<sup>[18]</sup>。该方法利用广域测量系统数据计算的故障识别函数, 对控制中心获得的过流保护、距离保护和方向方案信号进行分析, 并根据函数值来判断事件保护装置操作的正确性, 此外还提出了两个指标来判断电压电流测量准确性。最后基于 EMTP 对一个 38 节点系统进行仿真分析, 结果证明了该方法能够准确识别保护方案错误。

## 1 测量节点选择

保护方案的错误会在电网中引发故障, 本文所提方法旨在识别电网中的这些保护方案的决策错误。该方法利用同步电压和电流测量值计算的指标, 分析保护方案的运行信号<sup>[19-22]</sup>。在发生故障的情况下, 所有选定的测量节点上的保护装置都会观察到故障, 并将其反映在相应的指标值中。采用基于计算指标的函数对保护运行信号进行验证, 在检测到故障后, 将该事件分类为拒动或误动。

### 1.1 测量节点

该方法的同步相量测量点的选择依赖于所要进行分析的主备用保护方案。在电网中与线路相连的主保护被设计用来检测特定线路的故障, 而位于该位置的备用保护负责处理相邻线路中的故障。所提方法考虑了三种保护方案: 距离保护、方向保护和过电流保护。对保护方案分析中测量点的选取步骤如下:

- 1) 列出与保护装置所连接的线路相对应的两个节点;
- 2) 选择连接到步骤 1 中标识的两个节点的所有线路;
- 3) 对除去保护装置直接相连母线以外的所有线路末端进行同步测量。为了分析备用保护信号, 使用远端母线及其互连线路的数据。

为了保证所提方法能够正常使用, 至少要有两个节点的同步数据可用。

### 1.2 电压电流测量验证

在进一步处理之前, 要检查同步信号或同步信号数据的正确性, 且需针对所有选定线路进行验证。为验证电网中节点  $j$  处的电压和电流测量值, 定义了两个指标  $T_V$  和  $T_I$ , 分别如式(1)和式(2)所示。这些指标是用于扰动发生前的计算, 需要节点  $j$  及其相互连接节点的相电压数据。

$$T_V = \left| \sum_{i=1}^n [\vec{V}_j - \vec{V}_i] \times \vec{Y}_{ji} \right| \quad (1)$$

式中:  $\vec{V}_j$  和  $\vec{V}_i$  分别是节点  $j$  和节点  $i$  的电压值;  $n$  是与节点  $j$  相连接的节点数;  $\vec{Y}_{ji}$  是节点  $j$  和节点  $i$  的导纳。如果节点  $i$  上的同步测量不可用, 可以由相连节点(节点  $j$  除外)计算, 节点  $j$  有一个连接到该节点的同步相量测量设备。

对于每一个  $T_V$ , 其中每一项  $(\vec{V}_j - \vec{V}_i)\vec{Y}_{ji}$  给出流经节点  $i$  和  $j$  的线路电流。根据基尔霍夫电流定律, 理想情况下节点上所有线路的电流之和应为 0, 即

$$T_{I_{jz}} = |\overline{I_{jz}} - \overline{Y_{jz}}(\overline{V}_j - \overline{V}_z)| \quad (2)$$

式中,  $\overline{I_{jz}}$  是节点  $j$  与节点  $z$  之间线路的电流值。每个与节点  $j$  相连线路都需要计算  $T_{I_{jz}}$ 。

$T_I$  即是节点  $j$  和节点  $z$  之间电流测量值和计算值的差值。与指标  $T_V$  相似, 正确测量时值为 0。式(1)和式(2)中的表达式对于没有负载或电源的节点有效, 对于有负荷或电源的节点, 相应的电流相量分别从指标中减去。

两个指标的阈值都设定为 0.2 p.u., 若任一个指数高于阈值, 则丢弃该数据。阈值的设置考虑到在线参数值中导致指标非零的测量噪声和误差。对于电流信号的验证, 连接节点的电压测量必须正确, 因此指标  $T_V$  需在  $T_I$  之前得到验证。这些指标是根据故障预期数据计算所得, 如果测量集符合初始验证, 则需进行进一步分析。

## 2 保护指标计算

本节为距离保护、过电流保护和方向保护均定义了指标  $P$ 。利用保护整定值和同步电压、电流数据计算工作变量, 得到测量节点各继电保护方案的指标。

### 1) 距离保护

如果视在阻抗在保护工作区域内, 则保护装置可识别出电网中的故障。距离保护的对应指标  $P_D$  由式(3)计算。

$$P_D = \begin{cases} 0, & C > 1 \\ (1-C) \times 0.5 + 0.5, & C \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, 系数  $C$  是阻抗比, 计算如式(4)所示。

$$C = \frac{Z_c}{Z_s} \quad (4)$$

式中:  $Z_c$  是使用保护装置所连接线路的电压和电流测量值计算的视在阻抗;  $Z_s$  是测量节点上距离保护整定值。

当视在阻抗在保护装置工作区外时, 距离保护指数  $P_D$  为零。当视在阻抗在工作区域内时,  $P_D$  为非零值。根据视在阻抗与保护装置工作区域设置的比值  $C$ ,  $P_D$  指标在 0.5~1 范围内变化。

### 2) 过流保护

过流保护方案依赖于线路电流测量来检测故障状态。本文将传感器电流与工作曲线一起设置为保护工作的阈值, 式(5)给出了传感器电流运行时间之间的关系, 该指标采用逆定最小时间过电流保护特性。

$$T = \sqrt{\frac{K}{p(I_N^2 - 1)}} \quad (5)$$

式中:  $K$  和  $p$  是常数;  $I_N$  是归一化电流, 即用测量位置的电流  $I$  除以该位置保护装置的传感器电流值  $I_p$ 。基于传感器电流的  $I_p$ , 过电流保护指标  $P_I$  可由式(6)得到。

$$P_I = \begin{cases} 0, & \text{for } I < I_p \\ 0.5 \times (1 - T) + 0.5, & \text{for } I > I_p \end{cases} \quad (6)$$

如果从测量节点得到的线路电流  $I$  小于传感器电流, 则  $P_I$  为 0。如果当前值大于传感器电流, 则  $P_I$  非零。这符合保护在  $I < I_p$  时不动作的原则。

### 3) 方向保护

方向保护基于式(7)识别输电线上故障方向, 故障方向可能来自上游或者下游。

$$D = |\arg(\vec{V} / \vec{I})| \quad (7)$$

式中:  $\vec{V}$  和  $\vec{I}$  是从节点测量而得的电压电流向量;  $\arg$  是计算  $\vec{V}$  和  $\vec{I}$  之间的向量角。

正常情况下输电线上的功率因数在 0 至  $\pm\pi/6$  之前, 重载情况下功率因数在 0 至  $\pm\pi/4$  之前。故障情景下, 功率因数为  $\pi/2$  时达到方向保护的故障检测阈值。可通过式(8)计算方向保护指标  $P_F$ 。

$$P_F = \begin{cases} 0, & D < \frac{\pi}{4} \\ \left[ \frac{\pi}{2} \left( D - \frac{\pi}{4} \right) \right] + 0.5, & \frac{\pi}{4} < D < \frac{\pi}{2} \\ 1, & \frac{\pi}{2} < D \end{cases} \quad (8)$$

$P_F$  值随着相位角的变化而变化,  $P_F$  为 0 时代表没有故障; 相位角超过  $\pi/4$  时,  $P_F$  非零; 相位角为  $\pi/4$  时,  $P_F$  为 0.5。

## 3 保护决策分析

在线故障诊断识别获得详细信息, 基于故障识别分析进行保护决策分析<sup>[23-25]</sup>, 其中文献[23]提出

了基于目标函数优化的故障诊断方法。本文提出的故障识别函数采用目标函数的结构, 并对其进行了修改, 使其包含变电站中存在的不同的保护方案, 并在控制中心接收保护方案的指示信号。故障识别函数  $F$  使用式(4)、式(6)和式(8)中定义的指标来验证保护决策信号。距离保护、过流保护和方向保护的故障识别函数  $F$  如式(9)~式(11)所示。

$$F_D(b) = \left( S_D^b - \frac{1}{x} \sum_{i=1}^x P_{Ii} \right) \left( \frac{4}{y} \sum_{j=1}^y P_{Dj} \times \frac{1}{z} \sum_{k=1}^z P_{Fk} - 1 \right) \quad (9)$$

$$F_I(b) = \left( S_I^b - \frac{1}{y} \sum_{j=1}^y P_{2j} \right) \left( \frac{4}{x} \sum_{i=1}^x P_{Di} \times \frac{1}{z} \sum_{k=1}^z P_{Fk} - 1 \right) \quad (10)$$

$$F_F(b) = \left( S_F^b - \frac{1}{z} \sum_{k=1}^z P_{3k} \right) \left( \frac{4}{y} \sum_{j=1}^y P_{Ij} \times \frac{1}{x} \sum_{i=1}^x P_{Di} - 1 \right) \quad (11)$$

式中:  $S^b$  为节点  $b$  处保护方案的判定信号, 下标 D、I、F 分别对应距离、过电流、方向方案;  $S$  的值是根据中继方案的操作来分配的, 即  $S=1$  表示检测到故障,  $S=0$  表示没有故障;  $x$ 、 $y$  和  $z$  分别是计算  $P_D$ 、 $P_I$  和  $P_F$  所需数据的位置数, 这些值在故障发生时小于 0.5, 否则为 0。

现对三种情况下的故障识别函数的计算作如下说明。

#### 1) 误动

对于不需要的距离保护运算,  $S_D=1$ , 而指标  $P_D$ 、 $P_I$  和  $P_F$  为 0。因此函数  $F$  为负, 在这种情况下对相应的变电站进行重新布置, 以阻止保护装置的动作, 并在断路器打开的情况下重新接通断路器。

#### 2) 拒动

如果距离保护不能工作, 则信号  $S_D=0$ 。在此条件下, 指数  $P_D$ 、 $P_I$  和  $P_F$  取值范围在 0.5~1 之间。在这种情况下函数  $F$  也为负值, 在检测到故障之后将确定节点, 其中需要备份中继操作来清除网络中的故障。

#### 3) 正确操作

保护装置动作信号  $S=1$ 。同样, 指标  $P_D$ 、 $P_I$  和  $P_F$  是非零的, 这种情况下函数  $F$  为正值。

在母线上的保护方案发生故障时, 用于激活后备用保护节点的标识如下

$$[X] = [M][B] \quad (12)$$

式中:  $[M]$  为连通矩阵;  $[B]$  为与  $[M]$  相同大小的矩阵, 其中故障单元为 1 的节点对应的条目为  $[M]$ ;  $[X]$  为最终矩阵(大小与  $[M]$  相同), 其中备用保护连接的线路对应元素为 1。

备用保护的选择可用一个子系统来解释, 如图 1 所示。

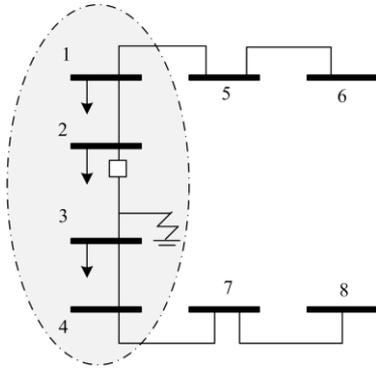


图 1 8 节点系统

Fig. 1 8-node test system

对于节点 2 上保护装置 R 因线路 2-3 运行时的故障，基于式(10)计算得到备用保护装置运行时的节点标识。节点 2 保护装置故障时矩阵  $[M]$ 、 $[B]$ 、 $[X]$  分别为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对于所选的四节点子系统，连通矩阵  $[M]$  的大小为  $4 \times 4$ ， $[M]$  具体取值基于网络的连接情况。其中，节点 1 和 1 是连接的，因此(1,1)元素取值为 1，没有线路连接节点 1 和 3，因此(1,3)元素取值为 0。以此类推，确定其他取值。矩阵  $[B]$  的大小与  $[M]$  相同，识别出保护故障的节点对应项为 1，本例中故障在节点 2，因此(2,2)取值为 1。矩阵  $[X]$  中元素(1,2)、(2,2)和(3,2)取值为 1，这表示节点 1 和 3 连接了节点 2 保护装置的备用保护装置。备用保护装置使用 1.1 节中选择的节点进行标识，矩阵大小为  $N \times N$ ，其中  $N$  为特定子系统选择的节点数。

本文所提方法仅使用电网部分数据，而不是整个网络的数据，方法流程图如图 2 所示。

相量计算需要一个周期的数据，50 Hz 的系统需要 20 ms。由于相量计算的处理延迟约为 10~20 ms，因此数据采集和相量计算的总时间为 40 ms。同步数据的最大延迟为 200 ms。为了启动后备保护方案，使用该方法获得的信号必须传送回变电站，考虑到数据通信的最大延迟，各操作的运

行时间如表 1 所示。各项指标计算所需的时间取决于决策中心的处理器速度，使用 3.2 GHz Intel i5 处理器的计算时间为 10~20 ms。

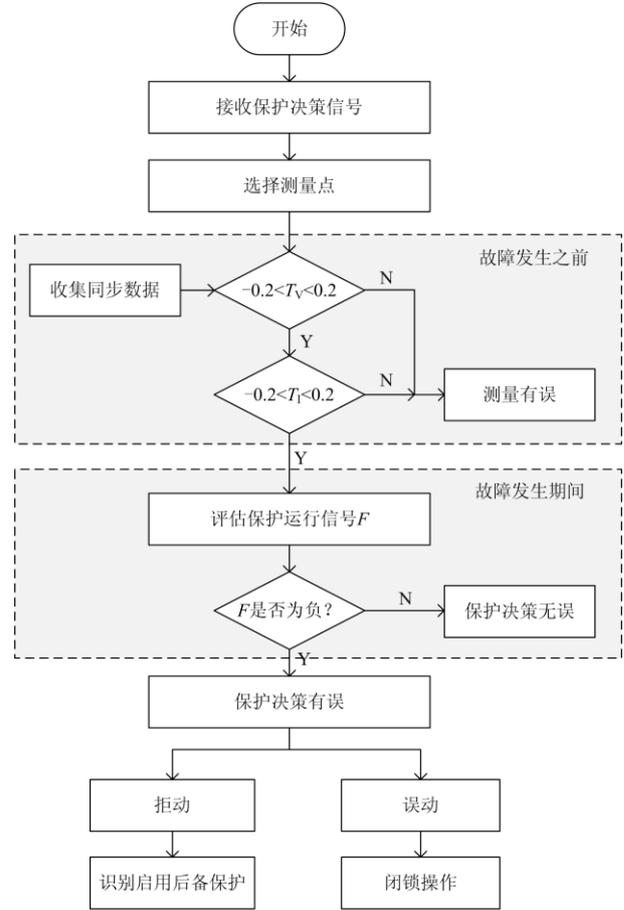


图 2 方法流程图

Fig. 2 Flow chart of proposed method

表 1 各操作的运行时间

Table 1 Running time of each operation

操作	时间/ms
数据采集和相量估计	40
通信	200
指标计算	10~20
启动后备保护	200
总计	450~460

## 4 仿真分析

基于 EMTP 在某 38 节点系统上对该方法进行测试，该系统如图 3 所示。电压和电流信号的采样速率为 1 kHz，利用单周期离散傅里叶变换估计相量值，以每秒 25 帧的速度读取同步数据。

### 4.1 过电流保护故障

过电流保护是否动作取决于网络中的电流水

平。本文模拟了过电流保护方案出现故障：线路 16-17 上节点 16 出现单项接地故障，故障阻抗为  $2\ \Omega$ ，故障时间发生在第 4 s，由于节点 16 处保护的整定电流设置较高，该节点的过电流保护相对应的操作信号  $S_1^{16}$  为零，因此无法检测到故障。

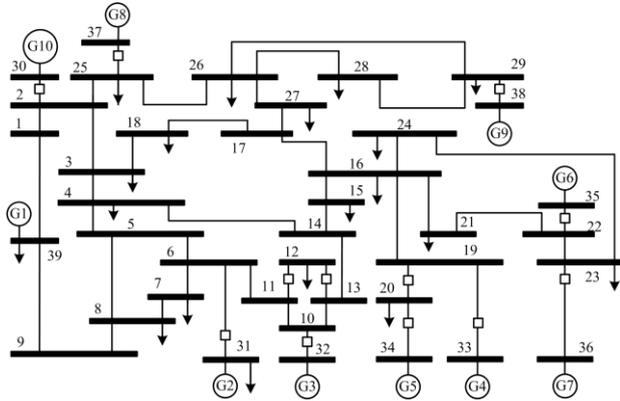


图 3 38 节点配电系统

Fig. 3 38-node distribution power system

可在此条件下证明该方法对故障的识别能力。随着故障发生产生了多个保护决策信号，在接收到来自距离保护标识  $S_D^{16} = 1$  和方向保护标识  $S_F^{16} = 1$  之后，开始对保护决策进行评估。为分析线路 16-17 上节点 16 的保护方案，根据 1.1 节所述方法选择测量位置，具体如表 2 所示，其中线路 16-17 上节点 16 可表示为 16(16-17)。中继节点为 16，远端节点为 15，与之相连的线路为 15-16、18-17、19-16、24-16、27-17。

表 2 评估节点 16 过流保护的测量点

Table 2 Measurement points for overcurrent protection evaluation at node 16

保护类型	测量节点(线路)
距离保护(2区)	17(17-16)
距离保护(3区)	15(15-16)、18(18-17)、19(19-16)、 21(21-16)、24(24-16)、27(27-17)
过流保护 与方向保护	15(15-16)、17(17-16)、17(17-18)、 17(17-27)、18(18-17)、19(19-16)、21(21-16)、 24(24-16)、27(27-17)

第一步是基于式(1)和式(2)来评估测量节点的数据。这种情况下，需要考虑节点 21 对的短路电流互感器测量值，对于节点 21 而言，连接节点是 22 和 16。可基于这两个节点的数据来分析节点 21 是否出现故障，故障开始于 4 s 时，可以计算出从 3 s 到故障开始点的前故障周期的指标。  $T_V$  小于 0，表示电压测量值可以接受，节点 21、16 连接的线路的

$T_1$  大于 0.2 表示数据有误。采用同样的方法，对其他节点测量结果的准确性进行测试。由于发现节点 21 的现有数据有误，故该节点未计算保护运行评估指标。

为研究节点 16 的距离保护、过流保护和方向保护运行信号，采用式(9)计算得到的指标  $P_D$ 、 $P_I$  和  $P_F$  评价故障识别函数  $F_D$ 、 $F_I$  和  $F_F$ ，结果如图 4 所示。函数  $F_I[16(16-17)]$  对应节点 16 上的过电流保护，其值为负表示有故障，该结果符合真实情况，因此本文所提方法可以正确识别过电流故障。

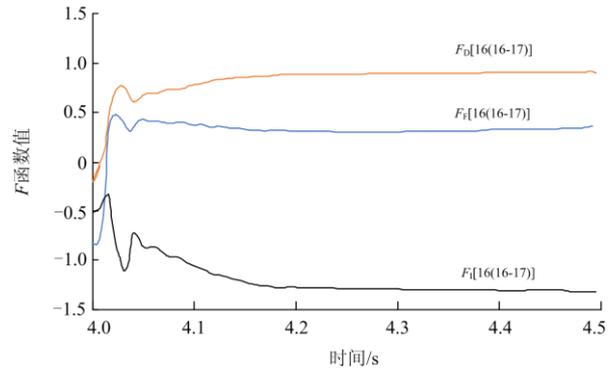


图 4 节点 16 过电流保护故障的各 F 函数值

Fig. 4 F-function value of node 16 overcurrent protection fault

#### 4.2 距离保护故障

距离保护的整定值是根据网络条件来设定的，由于整定值是固定的，在某些情况下若保护整定过低则无法识别故障。在节点 27 的距离保护中考虑了一个故障：线路 27-26 在 150 km 处发生故障(线路长度为 200 km)，节点 27 的距离保护无法识别其 1 区故障，如图 5 所示。因此，距离保护操作标识  $S_D^{27}$  为 0。

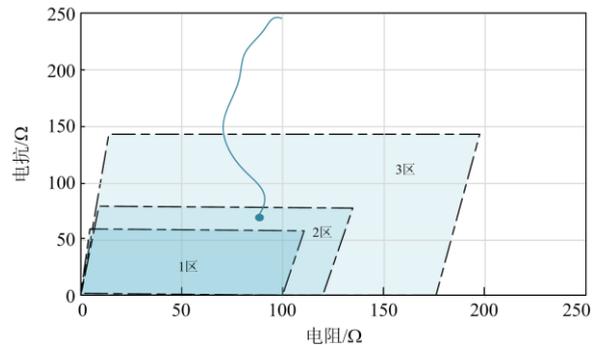


图 5 节点 27 距离保护 1 区故障示意图

Fig. 5 Schematic diagram of node 27 distance protection zone 1

距离保护 1 区、过流保护和节点 27 的方向保护的操作信号分别为 0, 1 和 1。由过电流保护 ( $S_1^{27} = 1$ )

和方向保护( $S_F^{27}=1$ )发出的决策信号启动算法。为评估节点 27 连接的线路 27-26 保护决策, 选择了节点 27 和 26 的保护装置, 表 3 列出了计算指标的测量位置, 与节点 27 的距离保护方案对应的函数  $F_D[27(27-26)]$  为负值, 说明其运行存在故障。

表 3 评估节点 27 距离保护的测量点

Table 3 Measurement points for the distance protection evaluation of node 27

保护类型	测量节点(线路)
距离保护(2 区)	26(26-27)
距离保护(3 区)	17(17-27)、25(25-26)、28(28-26)、29(29-26)
过流保护与方向保护	17(17-27)、25(25-26)、26(26-25)、26(26-27)、26(26-28)、26(26-29)、28(28-26)、29(29-26)

矩阵  $[M]$  由节点 17、25、26、27、28 和 29 构成, 矩阵大小为  $6 \times 6$ , 各元素取值依赖于所选节点的连接性。矩阵  $[B]$  对应于节点 27 的元素的值为 1, 其余元素为 0。将  $[M]$  和  $[B]$  相乘得到的矩阵  $[X]$ , 表示所需的备用保护为节点 17 和节点 26。通常情况下, 当 1 区发生故障时, 2 区单元在故障检测 200 ms 后运行并清除故障。在这种情况下, 很难确定 1 区中的故障, 这种误差可能导致故障清除的延迟, 影响系统的稳定性, 使用所提出的方法有助于防止此类错误再次发生。

#### 4.3 方向保护故障

方向保护使用故障电压和电流相量来确定网络中的故障情况, 对于串联补偿线路, 当故障回路的总阻抗变为电容性时, 故障电流超前系统电压  $90^\circ$ , 但保护装置电压与系统电压保持近似相同相位, 这种情况称为电流倒置, 可能会导致保护装置故障。在该情况下对线路 8-5 上节点的串联补偿为 70% 的情况进行分析。线路总长 220 km, 在 2.5 s 时距离节点 8 约 40 km 处发生故障, 测量节点如表 4 所示。由于故障回路的电容性, 故障电流可导致电压发生改变, 这导致节点 8 方向保护装置在相反的方向观察一个故障, 因此  $S_F^8=0$ 。节点 8 的故障识别函数  $F_F$  为负值, 如图 6 所示。

表 4 节点 8 方向保护故障测量点

Table 4 Measurement points for directional protection fault of node 8

保护类型	测量节点(线路)
距离保护(2 区)	5(5-8)
距离保护(3 区)	4(4-5)、6(6-5)、7(7-8)、9(9-8)
过流保护与方向保护	4(4-5)、5(5-4)、5(5-6)、6(6-5)、7(7-8)、9(9-8)

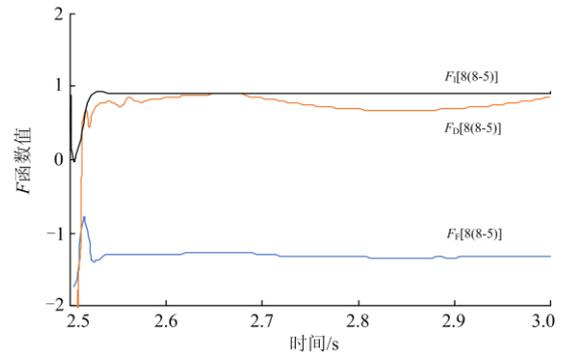


图 6 节点 8 放保护保护故障的各  $F$  函数值

Fig. 6  $F$ -function values of node 8 amplifier protection protection fault

#### 4.4 振荡闭锁故障

功率振荡会引起网络中节点间的角度变化, 系统中的电压和电流出现振荡, 导致视在阻抗与保护装置的工作特性不符, 导致距离保护误动。在此情况下, 节点 29、26 在 2.7 s 时发生三相故障, 为了清除故障断路器在 2.9 s 时动作, 导致功率振荡。振荡闭锁功能是为了防止保护装置在功率振荡时动作而设计的。此时, 线路 28-26 上节点 28 的保护装置振荡闭锁功能不正常, 保护装置发出误跳闸信号。线路 28-26 上节点 28 的保护装置受功率摆幅影响运行, 节点 28 上的距离保护启动算法, 用于计算节点 28 保护装置运行评估指标的测量节点如表 5 所示, 此时操作信号  $S_D^{28}=1$ 。

表 5 节点 28 振荡闭锁故障时测量点

Table 5 Measurement points for oscillation and blocking failure of node 28

保护类型	测量节点(线路)
距离保护(2 区)	26(26-25)、26(26-27)、26(26-29)
距离保护(3 区)	25(25-26)、27(27-26)、29(29-26)
过流保护、与方向保护	25(25-26)、26(26-25)、26(26-27)、26(26-28)、26(26-29)、27(27-26)、29(29-26)

所分析的决策是在节点 28 处进行的后备保护决策, 因此只使用来自远端节点 26 及其互连节点的数据。考虑到整定值适用于区间 2, 距离保护指标 PD 是根据 26:(26-27)、26:(26-25)或 26:(26-29)的数据计算的, 且在正方向上观察到故障。对于过流保护指标  $P_1$ , 考虑保护整定设置, 计算节点 26 处的指标。对于其他节点则考虑后备整定。节点 28 处的距离保护动作的故障识别函数  $F$  为负, 如图 7 所示, 这表明该节点出现了振荡闭锁故障。

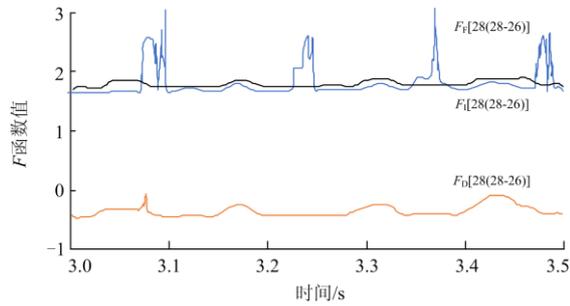


图7 节点28距离保护保护故障的各F函数值

Fig. 7 F-function values of node 28 distance protection protection fault

## 5 结论

电力系统保护方案中的错误会在故障状态下造成故障清除延迟或误动作, 从而影响电力系统的稳定性。针对这个问题, 本文提出了一个电力系统保护决策实时分析方法。该方法选定节点的同步电压和电流数据计算故障识别函数, 并依据该函数分析继电保护决策。不需要网络中所有节点的数据, 减少了数据通信相关的延迟, 且计算复杂度非常低, 能够快速做出决策。因此本文所提方法可以进行继电保护决策实时在线分析, 如果发现故障有助于更快地开始采取相应措施。仿真结果表明, 所提方法可在运行中准确识别保护方案决策中的错误。

## 参考文献

- [1] 梁辰, 邵能灵, 胡炎, 等. 基于保护信号的隐性故障检测[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 154-165.  
LIANG Chen, TAI Nengling, HU Yan, et al. Detection of hidden failure based on protection signals[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 154-165.
- [2] LIU Yiqing, GAO Houlei, GAO Weicong, et al. Development of a substation-area backup protective relay for smart substation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2544-2553.
- [3] 李岩军, 艾淑云, 王兴国, 等. 继电保护就地化及测试研究[J]. 智能电网, 2014, 2(3): 16-21.  
LI Yanjun, AI Shuyun, WANG Xingguo, et al. Locally installed mode and test research of relay protection[J]. Smart Grid, 2014, 2(3): 16-21.
- [4] PARIKH P P, SIDHU T S, SHAMI A. A comprehensive investigation of wireless LAN for IEC 61850-based smart distribution substation applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(3): 1466-1476.
- [5] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [6] 郭文鑫, 文福拴, 廖志伟, 等. 计及保护和断路器误动与拒动的电力系统故障诊断解析模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 6-10, 42.  
GUO Wenxin, WEN Fushuan, LIAO Zhiwei, et al. An analytic model for power system fault diagnosis with malfunctions of protective relays and circuit breakers taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 6-10, 42.
- [7] YU X, SINGH C. A practical approach for integrated power system vulnerability analysis with protection failures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1811-1820.
- [8] PRADHAN A K, KUNDU P. Online identification of protection element failure using wide area measurements[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(2): 115-123.
- [9] 童宁, 范理想, 林湘宁, 等. 不依赖边界元件及同步对时的多端柔直电网波形匹配式差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3820-3833.  
TONG Ning, FAN Lixiang, LIN Xiangning, et al. Waveform matching based protection strategy for VSC-MTDC independent on synchronization and boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3820-3833.
- [10] SEYED A H, JAVAD S, BABAK M. A wide-area fault location method considering gross measurement errors[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(18): 4670-4679.
- [11] 刘新宇. 电力系统扰动检测及信息建模[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
LIU Xinyu. Power system disturbance detection and information modeling[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [12] 徐文远, 雍静. 电力扰动数据分析学—电能质量监测数据的新应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 93-101, 15.  
XU Wenyuan, YONG Jing. Power disturbance data analytics—new application of power quality monitoring data[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 93-101, 15.
- [13] 裘愉涛, 王德林, 胡晨, 等. 无防护安装就地化保护应用与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 1-5.  
QIU Yutao, WANG Delin, HU Chen, et al. Application and practice of unprotected outdoor installation protection[J]. Electric Power Construction, 2016, 44(20): 1-5.
- [14] 牛强, 钟加勇, 陶永健, 等. 智能变电站二次设备就地化防护技术[J]. 电力建设, 2014, 35(9): 76-81.

- NIU Qiang, ZHONG Jiayong, TAO Yongjian, et al. In-situ secondary equipment protection of smart substation[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(9): 76-81.
- [15] 李刚, 黄继东, 倪传坤, 等. 智能变电站就地化保护仿真测试系统设计与探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 152-157.
- LI Gang, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Discussion on the construction scheme of intelligent substation on-site protection simulation test system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 152-157.
- [16] 邓茂军, 樊占峰, 倪传坤, 等. 就地化分布式变压器保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 95-100.
- DENG Maojun, FAN Zhanfeng, NI Chuankun, et al. Research on scheme of outdoor installation distributed transformer protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 95-100.
- [17] 周文越, 李霞, 刘明忠, 等. 就地化保护检验机制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 162-167.
- ZHOU Wenyue, LI Xia, LIU Mingzhong, et al. Research on outdoor installation protection inspection mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 162-167.
- [18] 徐彪, 尹项根, 张哲, 等. 计及拓扑结构的时间Petri网故障诊断模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2723-2735.
- XU Biao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Time Petri net based fault diagnosis model considering topology structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2723-2735.
- [19] 赵上林, 胡敏强, 窦晓波. 基于 IEEE 1588 的数字化变电站时钟同步技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 97-102.
- ZHAO Shanglin, HU Minqiang, DOU Xiaobo. Research of time synchronization in digital substation based on IEEE 1588[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 97-102.
- [20] BISWAL M, BRAHMA S, CAO H. Supervisory protection and automated event diagnosis using PMU data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1855-1863.
- [21] 卫琳, 张健康, 粟小华, 等. 电流二次回路缺陷造成线路保护误动作分析及防范措施[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 194-199.
- WEI Lin, ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, et al. Analysis and countermeasures for line protection mal-operation caused by current secondary circuit defects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 194-199.
- [22] KARPE S U, KALGUNDE M N. Power system backup protection in smart grid using synchronized PMU[C] // 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), October 3-5, 2016, Paralakhemundi, India.
- [23] RAHMAN M S, MAHMUD M A, OO A M T, et al. Multi-Agent approach for enhancing security of protection schemes in cyber-physical energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(2): 436-447.
- [24] 易妍, 方磊, 谢骏. 基于信息熵与 DS 证据理论的电网故障诊断方法[J]. 电气应用, 2018, 37(4): 26-29.
- YI Yan, FANG Lei, XIE Jun. Fault diagnosis method based on information entropy and D-S evidence theory[J]. Electric Technology, 2018, 37(4): 26-29.
- [25] 陈伟彪, 陈亦平, 姚伟, 等. 基于多源信息时间序列匹配的电网故障诊断方法[J]. 电力建设, 2016, 37(12): 134-142.
- CHEN Weibiao, CHEN Yiping, YAO Wei, et al. A fault diagnosis method of power grid based on time series matching with multi-source information[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(12): 134-142.

收稿日期: 2019-10-22; 修回日期: 2019-12-18

作者简介:

宋福海(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及其自动化; E-mail: 18001390116@189.cn

翟博龙(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及其自动化;

唐志军(1973—), 男, 硕士, 高级工程, 主要研究方向为电力系统继电保护及其自动化。

(编辑 张爱琴)