

DOI: 10.7667/PSPC160586

# 基于多层次架构的继电保护在线状态评价方法

刘 譞<sup>1</sup>, 李 川<sup>2</sup>

(1. 保定电力职业技术学院, 河北 保定 071051; 2. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 针对当前继电保护运行状态评价难以及时有效地反映保护实时运行情况, 难以实现保护系统的在线自动分析与状态评价的问题, 提出了保护运行状态的在线评价方法。引入了测量截距的概念, 提出了基于测量截距的故障线路识别方法, 避免了经过渡电阻接地时测量阻抗难以反映故障点到保护安装处实际阻抗的影响。构建了保护运行状态评价方法, 通过建立保护信息矩阵分层传输保护实时动作概率信息。利用故障元件和非故障元件保护动作概率信息实现对保护“四性”的评价。最后通过仿真对某实际电网进行了不同故障情况下的保护运行状态评价, 结果表明该方法能够快速识别故障线路并合理有效地完成保护运行状态评价。

**关键词:** 继电保护; 动作概率; 故障识别; 状态评价

## An online evaluation method of relay protection operation state based on multi-level framework

LIU Xuan<sup>1</sup>, LI Chuan<sup>2</sup>

(1. Baoding Electric Power VOC. & TECH. College, Baoding 071051, China;

2. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** To solve the problems that current protection operational state evaluation is ineffective to reflect the real-time operation of protection and accomplish online analysis and evaluation for protection system automatically, an online evaluation method of protection operating state is proposed. Based on the concept of measuring intercept, a fault line identification method is introduced, which avoids the influence of transition resistance on the distinction between measured impedance and real impedance from fault point to relay location. Evaluation method for operating state of protection system is built. Layered transmission of real-time operation probability message is realized through the establishment of the protection information matrices. The evaluation of protection “four characteristics” is done using operation probability of fault elements and non-fault element. Simulation of protection operation evaluation on different fault conditions in actual grid validate that the proposed method can identify the fault line rapidly and is effective and reasonable to evaluate operation state of the protection.

**Key words:** protective relaying; operation probability; fault identification; state evaluation

## 0 引言

作为保障电力系统安全运行的首道防线, 继电保护发生误动或拒动时可能严重影响电力系统正常运行, 扩大故障范围, 甚至造成连锁故障等严重后果<sup>[1]</sup>。因此必须保证继电保护运行的安全稳定性。

有效利用继电保护运行数据, 在线监测继电保护系统的运行状态<sup>[2]</sup>, 是减少此类现象发生的有效途径<sup>[3-4]</sup>。采用故障录波系统提供的历史统计数据作为数据来源<sup>[5]</sup>, 发现已投运继电保护系统的隐患和薄弱环节往往存在历史数据不全、继电保护系统评

估有效性不够的问题, 难以准确评估保护运行状态与电网运行情况之间的匹配程度, 因此需要建立实时反映保护运行状态的运行指标和监测手段。

随着智能电网的建设发展, 继电保护系统运行和监测所产生的数据量也在飞速增长, 数据量的急速扩充<sup>[6]</sup>为状态评价等应用提供了体量庞大、种类丰富的数据源<sup>[7-8]</sup>, 所包含的与继电保护设备状态相关的信息量是极为丰富的。在此大数据背景下, 对继电保护运行过程中产生的在线数据进行发掘、分析, 成为了在线辨别继电保护运行状态的新的可行途径<sup>[9]</sup>。

尽管故障录波系统能够向主站上传大量的保护

运行数据<sup>[10]</sup>,但这些数据通信量大、数据之间时间不同步,难以通过这些数据及时有效地反映保护实时运行情况,难以实现保护系统的在线自动分析与状态评价。因此有必要研究在二次系统大数据背景下,在大量数据产生过程中提炼出对保护系统状态评价最有效的信息,简化数据分析过程,实现信息的精简和继电保护在线自动分析评价。

为此,本文首先制定了故障线路的识别流程,提出了保护运行状态评估的精简数据指标,并以这些数据指标为基础,建立了继电保护运行状态的在线评价体系。

## 1 故障线路识别方法

### 1.1 测量截距的计算模型

输电线路发生接地故障时不可避免地存在过渡电阻,有时具有较大的数值。过渡电阻的存在,使阻抗继电器的测量阻抗中出现附加测量阻抗,破坏了测量阻抗与故障点到保护安装处线路阻抗的正比关系<sup>[11]</sup>。

以单相接地故障为例,当发生A相经 $R_g^{(1)}$ 接地时,附加测量阻抗 $\Delta Z_A$ 如式(1)所示。

$$\Delta Z_A = \frac{jI_{KA}^{(1)} R_g^{(1)}}{I_A + K \cdot 3I_0} \quad (1)$$

计及 $I_{KA}^{(1)} = 3I_{KA0}^{(1)}$ ,式(1)可写为

$$\Delta Z_A = \frac{3jI_{KA0}^{(1)} R_g^{(1)}}{I_A + K \cdot 3I_0} \quad (2)$$

因 $I_A = I_{loa.A} + C_{IM} I_{KA1}^{(1)} + C_{2M} I_{KA2}^{(1)} + C_{OM} I_{KA0}^{(1)}$ , $I_0 = C_{OM} I_{KA0}^{(1)}$ 计及 $I_{KA1}^{(1)} = I_{KA2}^{(1)} = I_{KA0}^{(1)}$ ,所以上式可化简为( $K$ 取实数)

$$\Delta Z_A = \frac{3R_g^{(1)}}{(2C_{IM} + (1+3K)C_{OM}) \frac{I_{loa.A}}{I_{KA0}^{(1)}}} \quad (3)$$

接地时附加测量阻抗的存在,会引起接地阻抗继电器保护区的变化。对于安装在送电侧的接地阻抗继电器,图1示出了保护正向动作特性,整定阻抗为 $Z_{set}$ ,当在图1(a)正向保护区外A相经 $R_g^{(1)}$ 接地时,附加测量阻抗 $\Delta Z_A$ 成容性,从而继电器的测量阻抗 $Z_m = Z_{lk} + \Delta Z_A$ 可能落入动作特性圆内,从而引起保护区的伸长(超越),严重时可能引起保护的越级动作。对于安装在受电侧的接地阻抗继电器,如图1(b),附加测量阻抗 $\Delta Z_A$ 呈感性,从而继电器的测量阻抗 $Z_m = Z_{lk} + \Delta Z_A$ 可能落在动作特性圆外,造成继电器拒动。这种情况引起继电器保护区的缩短。

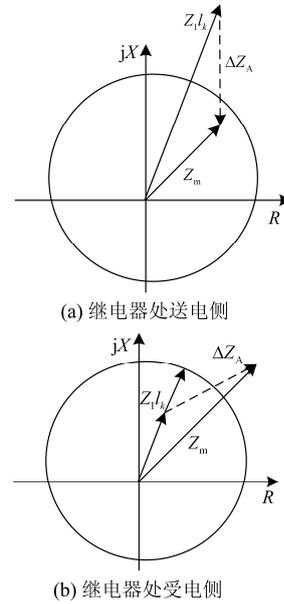


图1 过渡电阻对保护区的影响

Fig. 1 Effect of transition resistance on protective zone

上述这种保护区的伸长或缩短,随负荷电流的增大、过渡电阻的增大而加剧。在较短线路上接地阻抗继电器的正确动作受到严重影响。

通过在实测测量阻抗、附加测量阻抗构成的三角形中计算最大灵敏角方向上的阻抗分量,得到故障点到保护安装处线路阻抗大小,克服过渡电阻对保护区的影响。

设 $\beta$ 是单相接地时附加测量阻抗 $\Delta Z_A$ 的阻抗角,故有

$$\beta = \arg(\Delta Z_A) \quad (4)$$

在图2示出的圆—直线复合特性阻抗继电器动作特性中,附加阻抗与R轴夹角 $\beta$ 如式(5)所示。

定义最大灵敏角方向上的测量阻抗分量,即保护安装处到故障点的短路阻抗 $Z_n$ ,其模值如式(6)所示。

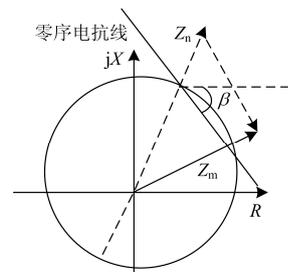


图2 零序电抗继电器动作特性

Fig. 2 Operating characteristics of zero-sequence reactance relay

$$\beta = \arg \frac{3\dot{I}_{K\varphi 0}^{(1)} R_g^{(1)}}{\dot{I}_\varphi + K \cdot 3\dot{I}_0} \approx \arg \frac{3\dot{I}_0}{\dot{I}_\varphi + K \cdot 3\dot{I}_0} \quad (5)$$

$$\left| \dot{Z}_n \right| = \frac{\left| \dot{Z}_m \right|}{\sin(\varphi_{\text{set}} + \beta)} \sin(\varphi_m + \beta) \quad (6)$$

式中:  $\varphi_{\text{set}}$  为最大灵敏角;  $\dot{I}_\varphi$  为测量相电流;  $\dot{I}_{K\varphi 0}^{(1)}$  为短路点的零序电流;  $K$  为零序电流补偿系数;  $\dot{I}_0$  为保护安装处的零序电流。

当发生两相经过渡电阻  $R_g^{(1)}$  接地故障时, 对故障相间测量阻抗计算  $\dot{Z}_n$  时上式仍成立。

## 1.2 利用测量截距识别故障线路

为了便于判别故障线路, 计算用来表示短路阻抗到保护动作边界的距离的保护短路阻抗动作概率  $P_{\text{aa}}$ 。当短路阻抗落在动作区域外时, 保护动作概率为 0; 在动作范围内, 圆心处的动作概率最大, 为 1, 短路阻抗动作概率按式(7)计算, 使得短路阻抗与动作概率的相关关系在圆的径向上呈线性变化。

$$P_{\text{aa}} = \begin{cases} \frac{2(|\dot{Z}_{\text{set}}^{\text{II}}| - |\dot{Z}_n|)}{(1 + \alpha)|\dot{Z}_{\text{set}}^{\text{II}}|}, & |\dot{Z}_{\text{set}}^{\text{II}}| > |\dot{Z}_n| \\ 0, & |\dot{Z}_{\text{set}}^{\text{II}}| < |\dot{Z}_n| \end{cases} \quad (7)$$

保护运行监测评估系统在对故障线路进行识别时, 采用最大灵敏角方向上的测量阻抗分量  $\dot{Z}_n$  是否落在保护动作范围内来判断故障线路。

## 2 利用保护信息矩阵识别故障线路

### 2.1 建立保护信息矩阵

保护装置采用启动元件动作触发方式: 如果任意保护元件启动元件动作, 则触发相应保护装置的动作概率计算程序。当保护启动元件动作后, 保护进入故障信号处理程序, 根据特征量的动作方程决定保护是否动作发出跳闸信号, 可以通过在保护软件设计中添加计算保护动作概率的简单程序, 采用文献[12-13]中的保护动作概率计算方法, 使保护每次进入故障信息处理程序时同时完成保护动作概率的计算。若此时保护装置启动但振荡闭锁标志字为 1, 说明保护处于振荡闭锁期间, 不上传数据, 避免振荡情况下主站错误评估。若保护启动元件已经启动并且振荡闭锁标志字为 0, 则上传当前测量阻抗和各段保护动作概率, 并标定上传时间。

采用分层分布式结构, 在空间维度结构上, 保护评估监控系统包含变电站间隔层分布式保护装置、位于各变电站同一电压等级侧的信息子站和位

于调度端的分析处理主站, 综合实现了纵向分层次的继电保护监控架构体系<sup>[14]</sup>, 并通过整合全网保护动作概率信息达到监测保护失效风险的目的; 在空间维度电压等级层次上, 不同电压等级划分为不同区域<sup>[15]</sup>, 区域间的保护风险监测相互独立。

将各变电站设置为保护监测评估系统的子站, 建立保护子站信息矩阵<sup>[16]</sup>, 初始化为全零矩阵, 对于距离保护需要建立 3 个子站单相接地保护评估矩阵  $C_\varphi$  ( $\varphi = A, B, C$ ) 和 3 个子站相间保护评估矩阵  $C_{\varphi\varphi}$  ( $\varphi\varphi = AB, BC, CA$ ), 子站的信息矩阵  $C$  格式为

$$C = \begin{bmatrix} P_{\text{act}1}^{\text{I}} & P_{\text{act}1}^{\text{II}} & P_{\text{act}1}^{\text{III}} & P_{\text{aa}1} & \text{protection No.1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{\text{act}k}^{\text{I}} & P_{\text{act}k}^{\text{II}} & P_{\text{act}k}^{\text{III}} & P_{\text{aa}k} & \text{protection No.k} \end{bmatrix}$$

子站利用接收到的保护上传的同时刻信息为评估矩阵赋值, 当子站评估矩阵不为全零阵时, 上传带时标的信息矩阵。

在调度中心设置保护监测评估系统主站, 主站中存储有确定故障线路和搜寻故障线路的远后备保护的保護系统结构矩阵  $B$ , 格式如下:

$$B = \begin{bmatrix} \text{保护1对端保护编号} & \text{保护1下一级保护编号} & \dots & \text{保护1下一级保护编号} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{保护m对端保护编号} & \text{保护m下一级保护编号} & \dots & \text{保护m下一级保护编号} \end{bmatrix}$$

主站接收到子站遇到突发事件上传的信息矩阵后, 定时主动采集保护动作概率信息。每隔 200 ms 向各子站发信号, 子站接收到主站指令后, 采集保护动作概率信息, 利用高精度的时钟同步系统建立的统一时空坐标<sup>[17]</sup>合成同一时刻的子站信息矩阵并上传带时标<sup>[18]</sup>的信息矩阵。

主站接收到子站信息矩阵后, 按照时标信息合并各子站上传的相同时刻的子站保护评估矩阵, 删除前三列动作概率全为零的行形成主站评估矩阵  $D$  并对其按列降序排序, 再利用排序后的主站信息矩阵分析保护运行状态。并将评估指标和结果按时间信息储存以便用于故障后分析。

主站利用各个子站上传的同一时刻保护动作概率和测量阻抗合成主站保护信息矩阵, 根据信息矩阵数据和存储在主站中的保护结构信息矩阵对系统当前运行状态进行判断。

### 2.2 故障线路识别流程

当系统发生故障或潮流转移等情况时, 保护启动<sup>[19]</sup>并上传数据。此时需要先判断系统是否存在故障线路并进行故障线路识别, 故障线路识别流程如图 3 所示。

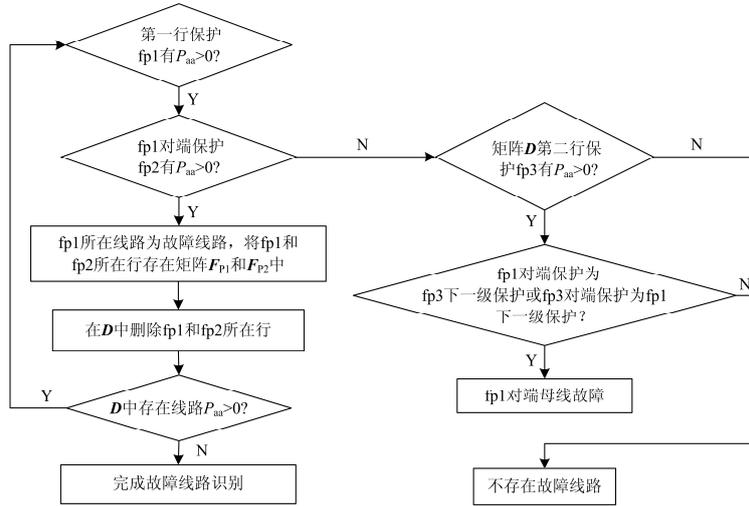


图 3 故障线路识别流程

Fig. 3 Fault line identification process

当主站完成故障线路识别过程后, 将主站信息矩阵  $D$ 、矩阵  $F_{p1}$ 、矩阵  $F_{p2}$  清零, 等待下一周期子站上传数据。

使用测量截距动作概率识别故障线路能够避免经过渡电阻接地故障时过渡电阻对故障识别的影响。当某条线路两端保护均有测量截距动作概率大于零时, 认为该线路发生短路故障。综合利用矩阵  $D$  和  $B$  中的信息, 可以识别母线故障, 避免了母线故障情况下, 主站误判得出错误的评估结果。当发生母线故障时, 与该母线相连线路上的电流均流向该故障母线, 线路对端保护的测量截距动作概率大于零。当矩阵  $D$  中存在测量截距动作概率大于零的保护为安装在与同一母线相连的线路上时, 认为此时系统发生母线故障。

### 3 基于保护动作概率的保护运行状态评价

继电保护的运行状态评价是利用一次系统故障前和故障后的信息, 对保护的动作为进行评判的过程<sup>[20]</sup>。其目的在于识别保护系统有无隐藏故障、有无整定错误、性能是否达到设计要求。

利用保护动作概率, 可从以下方面实现对继电保护系统的运行状态评价。

#### 1) 继电保护系统整定选择性评价

对于阶段式保护, 故障线路保护的上一级保护元件 II 段保护范围小于故障线路保护 I 段保护范围, 此时应满足:

$$P_{act}^I > P_{act}^{II} \quad (8)$$

#### 2) 继电保护系统可靠性评价

从切除故障的充裕度和选择性要求出发, 继电保护系统的可靠性表现在当一次系统故障后, 故障

处的保护装置不拒动, 而相邻非故障元件的后备保护不会误动作<sup>[18]</sup>。此时故障线路的继电保护装置保护  $fp1$  和  $fp2$  的动作概率应满足:

$$P_{act}^I \cup P_{act}^{II} > 0.5 \quad (9)$$

对于其他非故障线路应满足:

$$\begin{cases} P_{act}^I < 0.5 \\ P_{act}^{II} < P_{act}^{II} \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{act}^{III} < P_{act}^{III} \quad (11)$$

#### 3) 继电保护系统灵敏性评估

根据电力系统继电保护灵敏性的要求, 当系统故障时故障元件和相邻故障元件的继电保护装置都能敏锐感觉、正确反应。此时故障线路的继电保护装置  $fp1$  和  $fp2$  的 II 段动作概率应满足:

$$\begin{cases} P_{act}^{II}(fp1) > 0.5 \\ P_{act}^{II}(fp2) > 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

相邻非故障元件保护装置 III 段动作概率应满足:

$$P_{act}^{III} > 0.5 \quad (13)$$

#### 4) 继电保护系统快速性评价

对于主保护为纵联保护的输电线路, 应在故障发生后 5 个周波内将故障切除, 因此当主站对保护装置连续两次保护上传数据的判断结果均为存在故障时, 说明此时不满足保护装置快速性要求。

## 4 算例分析

某区域级电网局部示意图如图 4 所示。

将本文继电保护在线状态评价方法应用于该区域电网。由于电网规模较大, 只在图中示出故障线路及其上两级线路及相应变电站的部分, 该区域元件位置接线如图 4 所示, 各种故障仿真均在这个区域,

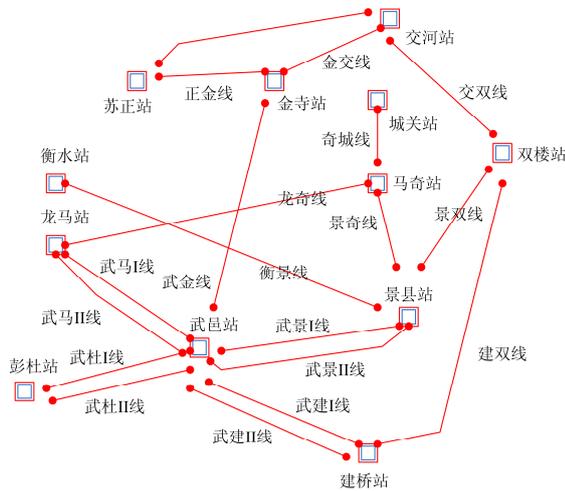


图 4 景双线电网位置图

Fig. 4 Location map of Jingshuang grid

线路参数和保护整定值如表1所示,采用该电网实际运行中使用的接地距离保护整定值。

在最大运行方式下分别在景双线距景县50%处设置A相金属性接地,经 $10\ \Omega$ 、 $20\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 过渡电阻接地故障,根据故障后测量阻抗数据计算保护动作概率,监测保护误动和拒动可能性。

表 2 为金属性接地时的测量阻抗数据,表 3—表 6 为经不同过渡电阻接地时的测量阻抗数据。

根据第 1.2 节的故障识别方案,可以利用  $P_{aa}$  对各种故障情况下的故障线路进行识别。算例中的计算结果表明,无论是金属性故障或经较大过渡电阻短路的情况,根据保护监测评估系统的故障识别流程都能准确识别故障线路。

故障发生时刻,保护元件上传的保护动作信息经子站上传至主站。主站信息矩阵如表 7 所示。

表 1 各线路参数及接地距离整定值

Table 1 Line parameters and ground distance protection setting value

| 线路名称  | 线路阻抗                     | 接地距离 I 段                    | 接地距离 II 段 | 接地距离 III 段 |
|-------|--------------------------|-----------------------------|-----------|------------|
| 景双    | $11.9 \angle 79.4^\circ$ | $7.0425 \angle 79.4^\circ$  | 22        | 22.17      |
| 交双    | $8.46 \angle 80.7^\circ$ | $5.191 \angle 80.7^\circ$   | 15.1478   | 18.765     |
| 武景 I  | $10.2 \angle 82.1^\circ$ | $4.193 \angle 82.1^\circ$   | 22.28     | 39.86      |
| 衡景    | $16.6 \angle 76.1^\circ$ | $9.836 \angle 76.1^\circ$   | 25.1034   | 25.103     |
| 奇景    | $9.86 \angle 83^\circ$   | $4.677 \angle 83^\circ$     | 24        | 52.815     |
| 双景    | $11.9 \angle 79.4^\circ$ | $7.356 \angle -109.8^\circ$ | 19.59     | 19.59      |
| 武景 II | $10.2 \angle 82.1^\circ$ | $4.162 \angle 82.1^\circ$   | 21.89     | 39.763     |

表 2 A相金属性接地各线路参数

Table 2 Line parameters of A phase grounding fault

| 线路名称  | 零序电流                            | A 相电流                           | K     | 测量阻抗                       | $P_{aa}$ |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|-------|----------------------------|----------|
| 景双    | $2227.9419 \angle -109.6^\circ$ | $6876.6699 \angle -109.6^\circ$ | 0.553 | $5.97 \angle 75.5^\circ$   | 0.72     |
| 交双    | $1957.5487 \angle -109.8^\circ$ | $5679.7901 \angle -109.8^\circ$ | 0.556 | $10.85 \angle 77.3^\circ$  | 0.31     |
| 建双    | $561.2121 \angle -110.6^\circ$  | $1664.6577 \angle -111.3^\circ$ | 0.521 | $30.28 \angle 77.2^\circ$  | 0        |
| 武景 I  | $473.8866 \angle -111.4^\circ$  | $1871.2559 \angle -110.9^\circ$ | 0.564 | $36.32 \angle 78.45^\circ$ | 0        |
| 衡景    | $546.3039 \angle -102.8^\circ$  | $1783.7546 \angle -105.1^\circ$ | 0.467 | $41.36 \angle 71.6^\circ$  | 0        |
| 奇景    | $424.8721 \angle -108.8^\circ$  | $924.7711 \angle -110.3^\circ$  | 0.511 | $49.6 \angle 76^\circ$     | 0        |
| 双景    | $1957.5487 \angle -109.8^\circ$ | $5679.7901 \angle -109.8^\circ$ | 0.553 | $6.06 \angle 75.7^\circ$   | 0.69     |
| 武景 II | $489.0935 \angle -111.0^\circ$  | $1896.7770 \angle -110.7^\circ$ | 0.564 | $35.6 \angle 78.2^\circ$   | 0        |

表 3 A相经 $10\ \Omega$ 过渡电阻接地各线路参数

Table 3 Line parameters of A phase grounding fault with  $10\ \Omega$  transition resistance

| 线路名称  | 零序电流                           | A 相电流                          | K     | 测量阻抗                      | $Z_n$ | $P_{aa}$ |
|-------|--------------------------------|--------------------------------|-------|---------------------------|-------|----------|
| 景双    | $1487.5028 \angle -71.0^\circ$ | $4591.2593 \angle -71.0^\circ$ | 0.553 | $14.6 \angle 23.2^\circ$  | 5.89  | 0.73     |
| 交双    | $641.7248 \angle -66.5^\circ$  | $2389.7436 \angle -69.3^\circ$ | 0.556 | $33.8 \angle 30^\circ$    | 17.79 | 0        |
| 建双    | $374.6953 \angle -72.0^\circ$  | $1111.4201 \angle -72.7^\circ$ | 0.521 | $64.2 \angle 28.66^\circ$ | 31.03 | 0        |
| 武景 I  | $316.3929 \angle -72.8^\circ$  | $1249.3548 \angle -72.3^\circ$ | 0.564 | $65.7 \angle 34^\circ$    | 34.09 | 0        |
| 衡景    | $364.7423 \angle -64.2^\circ$  | $1190.9338 \angle -66.5^\circ$ | 0.467 | $71.3 \angle 29.1^\circ$  | 35.72 | 0        |
| 奇景    | $283.6698 \angle -70.1^\circ$  | $617.4292 \angle -71.6^\circ$  | 0.511 | $103.9 \angle 27.5^\circ$ | 48.34 | 0        |
| 双景    | $1306.9703 \angle -71.2^\circ$ | $3792.1512 \angle -71.1^\circ$ | 0.553 | $16.7 \angle 20.3^\circ$  | 5.88  | 0.7      |
| 武景 II | $326.5468 \angle -72.4^\circ$  | $1266.3948 \angle -72.0^\circ$ | 0.564 | $64.4 \angle 33.72^\circ$ | 36.09 | 0        |

表 4 A相经20 Ω过渡电阻接地各线路参数

Table 4 Line parameters of A phase grounding fault with 20 Ω transition resistance

| 线路名称  | 零序电流              | A 相电流              | $K$   | 测量阻抗           | $Z_n$ | $P_{aa}$ |
|-------|-------------------|--------------------|-------|----------------|-------|----------|
| 景双    | 968.3770 ∠ -55.2° | 2988.9518 ∠ -55.3° | 0.553 | 26 ∠ 12.8°     | 5.79  | 0.737    |
| 交双    | 417.7681 ∠ -50.7° | 1555.7451 ∠ -53.5° | 0.556 | 55.9 ∠ 16.33°  | 15.93 | 0        |
| 建双    | 243.9305 ∠ -56.3° | 723.5441 ∠ -57.0°  | 0.521 | 110.7 ∠ 16.9°  | 32.43 | 0        |
| 武景 I  | 205.9760 ∠ -57.1° | 813.3430 ∠ -56.6°  | 0.564 | 99.9 ∠ 20.45°  | 35.24 | 0        |
| 衡景    | 237.4516 ∠ -48.4° | 775.3118 ∠ -50.8°  | 0.467 | 115.6 ∠ 30.9°  | 61.16 | 0        |
| 奇景    | 184.6718 ∠ -54.4° | 401.9546 ∠ -55.9°  | 0.511 | 178.8 ∠ 15.58° | 48.38 | 0        |
| 双景    | 850.8511 ∠ -55.4° | 2468.7266 ∠ -55.4° | 0.553 | 30.34 ∠ 11°    | 5.79  | 0.704    |
| 武景 II | 212.5854 ∠ -56.6° | 824.4359 ∠ -56.3°  | 0.564 | 106.4 ∠ 20.1°  | 36.92 | 0        |

表 5 A相经50 Ω过渡电阻接地各线路参数

Table 5 Line parameters of A phase grounding fault with 50 Ω transition resistance

| 线路名称  | 零序电流              | A 相电流              | $K$   | 测量阻抗         | $Z_n$ | $P_{aa}$ |
|-------|-------------------|--------------------|-------|--------------|-------|----------|
| 景双    | 458.9031 ∠ -41.7° | 1417.3397 ∠ -41.7° | 0.553 | 60.06 ∠ 5.6° | 5.96  | 0.729    |
| 交双    | 199.8711 ∠ -41.7° | 740.3914 ∠ -41.7°  | 0.556 | 122.5 ∠ 8.5° | 18.35 | 0        |
| 武景 I  | 30.8355 ∠ -41.7°  | 144.2874 ∠ -41.7°  | 0.564 | 269.3 ∠ 8.5° | 40.19 | 0        |
| 衡景    | 114.5689 ∠ -41.7° | 372.3432 ∠ -41.7°  | 0.467 | 247.7 ∠ 8.7° | 16.22 | 0.354    |
| 奇景    | 87.6418 ∠ -41.7°  | 190.1139 ∠ -41.7°  | 0.511 | 403.7 ∠ 6.9° | 9.41  | 0.608    |
| 双景    | 403.6883 ∠ -41.7° | 1170.4345 ∠ -41.7° | 0.553 | 70.9 ∠ 4.7°  | 5.91  | 0.698    |
| 武景 II | 99.6557 ∠ -41.7°  | 388.7425 ∠ -41.7°  | 0.564 | 235.9 ∠ 8.5° | 35.20 | 0        |

表 6 A相经100 Ω过渡电阻接地各线路参数

Table 6 Line parameters of A phase grounding fault with 100 Ω transition resistance

| 线路名称  | 零序电流              | A 相电流             | $K$   | 测量阻抗          | $Z_n$ | $P_{aa}$ |
|-------|-------------------|-------------------|-------|---------------|-------|----------|
| 景双    | 234.2712 ∠ -35.9° | 723.5580 ∠ -35.9° | 0.553 | 118.9 ∠ 2.8°  | 5.91  | 0.731    |
| 交双    | 102.0354 ∠ -35.9° | 377.9736 ∠ -35.9° | 0.556 | 241.6 ∠ 4.3°  | 18.36 | 0        |
| 建双    | 58.4153 ∠ -35.9°  | 173.9054 ∠ -35.9° | 0.521 | 498.9 ∠ 3.4°  | 29.82 | 0        |
| 武景 I  | 49.0949 ∠ -35.9°  | 195.5159 ∠ -35.9° | 0.564 | 475.5 ∠ 4.3°  | 37.51 | 0        |
| 衡景    | 58.4881 ∠ -35.9°  | 190.0838 ∠ -35.9° | 0.467 | 432.8 ∠ 3.1°  | 24.12 | 0.039    |
| 奇景    | 44.7421 ∠ -35.9°  | 97.0551 ∠ -35.9°  | 0.511 | 532.2 ∠ 2°    | 18.7  | 0.221    |
| 双景    | 206.0839 ∠ -35.9° | 597.5123 ∠ -35.9° | 0.553 | 140.72 ∠ 2.3° | 5.75  | 0.706    |
| 武景 II | 50.8746 ∠ -35.9°  | 198.4554 ∠ -35.9° | 0.564 | 303.9 ∠ 4.1°  | 21.94 | 0        |

表 7 主站信息矩阵

Table 7 Information matrix of the master

| 过渡电阻   | 0   | 10  | 20   | 50   | 100  |
|--------|---|---|--|--|--|
| 主站信息矩阵 | $\begin{bmatrix} 0.88 & 1 & 1 & 0.72 & \text{景双} \\ 0 & 1 & 1 & 0.31 & \text{交双} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{建双} \\ 0 & 0 & 0.72 & 0 & \text{武景I} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{衡景} \\ 0 & 0 & 0.65 & 0 & \text{奇景} \\ 0.94 & 1 & 1 & 0.69 & \text{双景} \\ 0 & 0 & 0.76 & 0 & \text{武景II} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0.73 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.87 & 0.87 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 0.045 & 0.068 & 0.737 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.704 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.729 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.354 \\ 0 & 0 & 0 & 0.608 \\ 0 & 0 & 0 & 0.698 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.731 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.039 \\ 0 & 0 & 0 & 0.221 \\ 0 & 0 & 0 & 0.706 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ |

根据主站信息矩阵数据，主站可以快速准确地掌握当前的电网故障和保护运行情况，并对保护运行状态进行评估。

1) 选择性：根据动作概率，在各种情况下，景双线及附近线路上的阶段式距离保护均满足选择性要求。

2) 灵敏性: 当过渡电阻为 $20\ \Omega$ 及以上时, 故障线路的距离保护I段、II段和III段均不动作, 相邻线路的距离III段也不动作, 无法满足保护灵敏性要求。

3) 可靠性: 利用失效概率计算公式计算保护II段和III段拒动概率分别为0.13和0.0169, 可能拒动; 当过渡电阻为 $20\ \Omega$ 时, 景双线景县侧保护II段和III段拒动概率分别为0.955和0.89, 极有可能发生拒动, 无法切除故障线路; 当过渡电阻增大到 $50\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 时, 景双线两侧保护I段、II段、III段保护拒动概率均为1, 此时依靠阶段式距离保护无法切除故障线路。

## 5 结论

继电保护系统的状态评价通常利用故障录波装置收集的大量录波数据, 不可避免地存在数据通信量大, 分析过程复杂, 不能及时发现继电保护系统在运行过程中存在的隐藏缺陷的问题。本文首先引入了测量截距的概念, 通过计算测量截距能够迅速定位故障线路, 避免过渡电阻的影响。通过构建保护监测评估架构定时传输保护动作概率和测量值, 充分利用保护装置内部信息监测当前保护运行状态。建立基于保护动作概率的保护状态评价指标, 实现保护运行状态的在线监测和评价。该方法具有以下特点:

1) 通过构建保护监测评估架构只向主站上传已启动保护的動作概率信息, 解决了直接采用大量故障录波信息进行分析引起的数据通信量过大、数据不可用等问题。

2) 采用定时上传数据的方法, 每隔 $200\ \text{ms}$ 判断一次子站是否满足上传数据要求, 保证评价信息的实时性, 可以实现继电保护状态的在线评价。采用基于保护动作概率的评价指标, 精简了数据分析和状态评价过程。

3) 通过基于测量阻抗的故障线路识别方法快速准确地识别故障线路, 确保了对故障元件保护和非故障元件保护均进行准确的分析评价。

仿真实验验证了此方法的有效性, 结果表明系统处于不同故障情况下, 保护监测评估系统均能准确识别故障线路并完成对保护运行状态的准确评价。

## 参考文献

[1] VAIMAN M, BELL K, CHEN Y, et al. Risk assessment of cascading outages: methodologies and challenges[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 631-641.

[2] 王跃强, 廖华兴, 袁晓青, 等. 基于保信系统的继电保

护状态评价系统的开发与利用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 134-139.

WANG Yueqiang, LIAO Huaxing, YUAN Xiaoqing, et al. Development and application of relay protection condition evaluation system based on fault information processing system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 134-139.

[3] 陈星田, 熊小伏, 齐晓光, 等. 一种用于继电保护状态评价的大数据精简方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 27(6): 176-182.

CHEN Xingtian, XIONG Xiaofu, QI Xiaoguang, et al. A big data simplification method for evaluation of relay protection operation state[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 27(6): 176-182.

[4] 熊小伏, 陈星田, 郑昌圣. 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. Overview of research on state evaluation of relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 51-58.

[5] 宋人杰, 陈禹名. 基于变权系数的继电保护状态模糊综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 46-50.

SONG Renjie, CHEN Yuming. Fuzzy synthetic evaluation of relay protection based on variable weight value[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 46-50.

[6] 葛磊蛟, 王守相, 王尧, 等. 多源异构的智能配用电数据存储处理技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊2): 159-168.

GE Leijiao, WANG Shouxiang, WANG Yao, et al. Storage and processing technology of the multi-source isomerized data for smart power distribution and utilization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S2): 159-168.

[7] 杨光亮, 乐全明, 郁惟镛, 等. 基于小波神经网络和故障录波数据的电网故障类型识别[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 99-103.

YANG Guangliang, YUE Quanming, YU Weiyong, et al. A fault classification method based on wavelet neural networks and fault record data[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 99-103.

[8] GU Y H, BOLLEN H J Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(4): 1279-1284.

[9] 宋亚奇, 周国亮, 朱永利. 智能电网大数据处理技术

- 现状与挑战[J]. 电网技术, 2013, 34(4): 927-934.  
SONG Yaqi, ZHOU Guoliang, ZHU Yongli. Present status and challenges of big data processing in smart grid[J]. Power System Technology, 2013, 34(4): 927-934.
- [10] 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[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.
- [11] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 157-167.
- [12] 戴志辉, 王增平, 焦彦军, 等. 继电保护原理性失效概率模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 16-20.  
DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun, et al. An operation failure probability model for power system protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 16-20.
- [13] 戴志辉, 刘譞, 焦彦军. 基于保护动作概率模型的距离保护误动识别[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6057-6065.  
DAI Zhihui, LIU Xuan, JIAO Yanjun. Misoperation identification of distance protection based on protection operation probability model[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6057-6065.
- [14] 邱金辉, 钱海, 张道农, 等. 基于PFIS的继电保护常态特性在线监测与隐性故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 145-149.  
QIU Jinhui, QIAN Hai, ZHANG Daonong, et al. Online monitoring of normal behavior and diagnosis of hidden failures in protection system based on PFIS[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 145-149.
- [15] 葛少云, 季时宇, 刘洪, 等. 基于多层次协同分析的高中压配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 172-181.  
GE Shaoyun, JI Shiyu, LIU Hong, et al. Reliability assessment of high-medium voltage level distribution networks based on cooperative analysis of multi-level networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 172-181.
- [16] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.  
WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.
- [17] 李俊刚, 张爱民, 张杭, 等. 广域保护系统数据网络可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 344-350.  
LI Jungang, ZHANG Aimin, ZHANG Hang, et al. Reliability evaluation of the wide area protect system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 344-350.
- [18] 罗士萍. 微机保护实现原理及装置[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [19] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [20] 董新洲, 丁磊, 刘琨, 等. 基于本地信息的系统保护[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 7-13.  
DONG Xinzhou, DING Lei, LIU Kun, et al. System protection based on local information[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 7-13.

收稿日期: 2016-04-25; 修回日期: 2016-07-24

作者简介:

刘 譞 (1991-), 女, 硕士, 初级讲师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: liu1991xuan0211@163.com

李 川 (1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 魏小丽)