

智能变电站故障信息模型与继电保护在线监测方法

刘琨^{1,2}, 黄明辉^{1,2}, 李一泉^{1,2}, 陈志光^{1,2}, 曾耿晖^{1,2}, 刘玮^{1,2}, 苏忠阳³

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600;

2. 广东电网有限责任公司 RTDS 继电保护仿真重点实验室, 广东 广州 510600;

3. 广州穗华能源科技有限公司, 广东 广州 510530)

摘要:充分利用智能变电站信息开放与信息共享的优势,提出基于智能变电站系统特性的继电保护在线监测新方法。全面分析继电保护在线监测功能需求,提出继电保护在线监测思路;建立包含一次系统间隔模型、二次系统端口模型、二次系统逻辑模型的智能变电站故障信息模型,在此基础上,充分描述继电保护状态信息间的耦合及关联关系,自动辨识继电保护关键状态,并实现继电保护故障定位。算例分析结果表明,基于智能变电站故障信息模型的继电保护在线监测方法可实现继电保护关键状态的辨识,并实现精准的故障定位。

关键词:智能变电站;在线监测;状态信息;故障信息模型;继电保护

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.027

0 引言

智能变电站具有信息开放与信息共享的优势,同时为了实现智能变电站的高效经济运行,基于智能变电站继电保护状态在线监测以实现不停电运检技术成为新的研究热点^[1-4]。目前,继电保护状态在线监测研究对象主要集中在单个装置或二次回路^[5-7],并未考虑智能变电站的系统特性。研究方法主要局限于单个信息与理论值的比较,或者利用继电保护历史/实时运行信息、家族缺陷历史信息等给继电保护打分,以获得继电保护的运行状态^[7-8]。前者并未考虑继电保护状态信息间丰富的耦合及约束关系,并未充分利用信息共享的优势,而后者基于权重的打分方式则存在较强的主观性。

智能变电站的信息开放与信息共享使得继电保护综合利用多个状态信息及其约束关系实现在线监测成为可能,给继电保护在线监测提供了新的思路^[9-11]。但目前对此的研究主要针对信息开放及上传协议、规范^[12-13],并未直接研究基于信息开放与信息共享的在线监测方法。为此,本文针对继电保护状态在线监测的需求,建立智能变电站故障信息模型,利用智能变电站的系统特性对整个继电保护系统的状态信息进行在线、自动的整合与分析,辨识隐藏于状态信息间的继电保护关键状态,并进一步确定故障点或故障范围。

1 智能变电站故障信息模型

本文提出的基于智能变电站系统特性的继电保护在线监测方法是充分利用继电保护状态信息间丰富的耦合及约束关系,以实现全面分析和评价继电保护状态,并实现故障定位。考虑到继电保护状态信息繁多且耦合关系复杂,而现有的智能变电站的全站配置文件(SCD)只描述了智能电子设备(IED)的功能与设备间的通信行为,没有直接描述信息间的约束关系。因此需要建立智能变电站故障信息模型,用于确定状态信息间的耦合约束关系,并与状态信息实时耦合约束进行比较,辨识出继电保护异常状态信息,进而确定继电保护的故障点或故障范围。

继电保护状态信息间的关系包括一次系统固有连接关系^[14]、二次系统物理连接关系、二次系统逻辑连接关系、继电保护业务特点以及保护原理配合等带来的状态信息间的耦合约束关系等。因此,智能变电站故障信息模型应具备以下功能:

- a. 模型应包含所有状态信息以及制约状态信息间关系的运行方式信息;
 - b. 模型应能获得基于一次系统固有连接关系的状态信息间函数关系;
 - c. 模型应能获得基于二次系统物理连接关系/二次系统逻辑连接关系的状态信息间函数关系;
 - d. 模型应能获得基于继电保护业务特点以及保护原理配合的状态信息间函数关系;
 - e. 模型应能结合故障信息实现故障定位。
- 基于此,本文提出智能变电站故障信息模型基

收稿日期:2016-12-06;修回日期:2017-11-17

基金项目:中国南方电网公司科技项目(K-GD2014-186)

Project supported by the Science and Technology Program of China Southern Power Grid(K-GD2014-186)

本构架如图1所示。

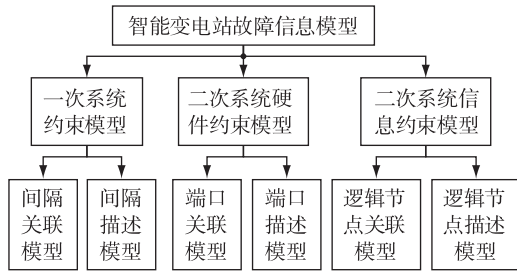


图1 智能变电站故障信息模型

Fig.1 Fault information model of smart substation

1.1 一次系统约束模型

考虑到继电保护按间隔配置,且间隔是检修、改扩建等运检工作的一个基本单元,因此,本文以间隔为最小单元建立一次系统约束模型,其包含间隔关联模型与间隔描述模型。

1.1.1 间隔关联模型

假设任意相连间隔均通过某一母线(若不存在实际母线,则定义虚拟母线作为电能的汇集点)相连,用 b 表示母线编号,则可用矩阵 $\mathbf{X}_{k \times k}^{(b)}$ 描述一次系统中间隔与间隔间关联关系,其中 k 为间隔数目。

$$\mathbf{X}_{k \times k}^{(b)} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{k1} & x_{k2} & \cdots & x_{kk} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{间隔 } i, j \text{ 因母线 } b \text{ 而关联, } i \neq j \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

1.1.2 间隔描述模型

间隔描述模型用于描述间隔的基本信息,实现一、二次系统的关联。由于系统规则文件(SSD)描述的一次系统模型中包含逻辑节点(LN),可以此实现一、二次系统的关联。因此,间隔描述模型可由解析SSD自动获得,以集合 M_i 形式表示,用于描述逻辑节点与间隔的关联关系,其主要元素为逻辑节点。各逻辑节点按照间隔顺序、SSD层次化顺序依次排序,以LN+序号的方式命名逻辑节点,如式(2)所示。

$$M_i = \{ \text{LN}_1, \text{LN}_2, \text{LN}_3, \dots \} \quad (2)$$

1.2 二次系统硬件约束模型

智能变电站二次设备端口是设备间光纤连线的节点,是设备与外界信息交互的基本单元^[15-16]。当设备正常运行时,设备通过端口与其他设备交互信息;当设备检修时,设备通过端口隔离与其他设备间的联系。因此,以端口为最小单元建立二次系统硬件约束模型,其包含端口关联模型与端口描述模型。

1.2.1 端口关联模型

端口之间既可以通过物理介质相连也可以通过交换机内转发机制相连,因此下文分别建立端口物理关联模型和端口逻辑关联模型。

建立关联矩阵 $\mathbf{D}_{m \times m}$ 表示不同端口间的物理连接关系,其中 m 为全站二次设备端口数目。

$$\mathbf{D}_{m \times m} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$d_{st} = \begin{cases} 1 & \text{端口 } s \text{ 与端口 } t \text{ 通过物理介质相连} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

建立关联矩阵 $\mathbf{C}_{m \times m}$ 表示不同端口间的逻辑关联关系。

$$\mathbf{C}_{m \times m} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$c_{st} = \begin{cases} 1 & \text{信息可从端口 } s \text{ 经交换逻辑转移至端口 } t \\ & \text{且信息流由端口 } t \text{ 指向端口 } s \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

1.2.2 端口描述模型

端口描述模型包括IED端口描述模型和交换机端口描述模型。IED端口描述模型可以描述各个端口所连接的光纤以及包含的逻辑节点。另外,由于报文是设备间信息交互的载体,而设备端口是发送、接收报文的最小单位。因此IED端口描述模型还应包括经由该端口转发的SV报文和GOOSE报文,交换机端口描述模型应包括虚拟局域网等信息。

端口描述模型用集合 Y_s 描述IED端口 s ,集合 Y'_s 描述交换机端口 s ,分别如式(5)、(6)所示。

$$Y_s = \{ \{ \text{LN}_1, \text{LN}_2, \dots \}, \{ \text{SV}_1, \text{SV}_2, \dots \}, \{ \text{GOOSE}_1, \text{GOOSE}_2, \dots \}, \text{FiberName} \} \quad (5)$$

$$Y'_s = \{ \{ \text{VID}_1, \text{VID}_2, \dots \}, \text{PVID}, \text{FiberName} \} \quad (6)$$

其中,FiberName为光纤名,采用端口1-2的命名形式(端口1序号小于端口2序号,且全站设备端口统一编号);VID(VLAN ID)、PVID(Port-based VLAN ID)为基于端口划分VLAN的参数。模型中所有逻辑节点均采用基于IEC61850标准的实例化名称。

1.3 二次系统信息约束模型

在IEC61850协议中,逻辑节点是交换数据的最小单元。逻辑节点代表物理装置内的某项功能,或执行这一功能的某些操作,是一个由数据和方法定义的对象。因此以逻辑节点为最小单元建立二次系

统信息约束模型,其包含逻辑节点关联模型与逻辑节点描述模型。

1.3.1 逻辑节点关联模型

建立逻辑节点间关联矩阵 $N_{p \times p}$, 描述逻辑节点间的映射关系, 其中 p 为逻辑节点数。

$$N_{p \times p} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & \cdots & n_{1p} \\ n_{21} & n_{22} & \cdots & n_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ n_{p1} & n_{p2} & \cdots & n_{pp} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$n_{ef} = \begin{cases} 1 & \text{LN}_e \text{ 向 } \text{LN}_f \text{ 传输数据或 } e = f \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

1.3.2 逻辑节点描述模型

选择逻辑节点作为信息交互的最小单元, 逻辑节点中包含了继电保护系统运行的测量、控制、状态以及定值等信息, 不同类型的逻辑节点可以用不同的集合 Z_{LN} 或字符串表示, 具体如表 1 所示, 其中逻辑节点描述模型里的内容均可以通过解析 SCD 文件获得。

表 1 逻辑节点描述模型

Table 1 Description model of logical node

类别	定义	具体内容
物理设备逻辑节点	字符串 $\{LPHD\}$	设备名称+直流电源名称
逻辑节点零	集合 Z_{LLN0}	$Z_{\text{LLN0}} = \{\{DataSet_1, \dots\}, \{FuncEna_1, \dots\}\}$ 数据集字符串 $\{DataSet\}$ 内容为数据集名称+控制块名称; 功能软压板字符串 $\{FuncEna\}$ 内容为软压板名称+状态, 其中状态取值为 0、1, 分别表示软压板断开、闭合状态
保护类逻辑节点	集合 Z_p	$Z_p = \{\{Str\}, \{Op\}, \{Setting_1, Setting_2, \dots\}\}$ 启动字符串 $\{Str\}$ 内容为 Str+状态; 动作字符串 $\{Op\}$ 内容为 Op+状态, 其中状态取值为 0、1, 表示该保护逻辑节点启动/动作与否; 定值字符串 $\{Setting\}$ 内容为定值名称+定值取值
采样值类逻辑节点	字符串 $\{TCTR\}$ 和 $\{TVTR\}$	$\{TCTR\}$ 内容为 Amp(采样值大小)+方向系数 K_1 (取值为 1 或 -1, 分别表示当前互感器电流方向为由母线流出或流入)+相别(A/B/C 相)+用途(P(保护用)/M(测量用)); $\{TVTR\}$ 内容为 Vol(采样值大小)+变比系数 K_2 (取值为 k' , k' 为其他侧电压与给定母线侧电压之比)+相别(A/B/C 相)+用途(P/M)
开关量采集类逻辑节点	集合 Z_{XCBB}	$Z_{\text{XCBB}} = \{\{Pos\}, \{CBOpCap\}\}$ 断路器位置字符串 $\{Pos\}$ 内容为 Pos+状态, 其中状态取值为 0、1, 分别表示断路器断开、闭合状态; $\{CBOpCap\}$ 表示断路器操作能力字符串
出口类逻辑节点	集合 Z_{PTRC} 和 Z_{RREC}	$Z_{\text{PTRC}} = \{\{Strp\}, \{Tr\}, \{Op\}, \{Str\}, \{Setting\}\}$, $Z_{\text{RREC}} = \{\{Op\}, \{Setting\}\}$ 出口压板字符串 $\{Strp\}$ 内容为 Strp+状态, 状态取值为 0、1, 分别表示该出口压板断开、导通; 跳闸字符串 $\{Tr\}$ 内容为 Tr+状态, 状态取值为 0、1, 表示跳闸与否; $\{Setting\}$ 表示定值字符串

2 继电保护状态在线监测方法

本文提出的智能变电站故障信息模型可用于实

现基于状态信息耦合与关联关系的状态信息整合和分析, 实现继电保护状态的打包监测, 并进一步实现故障定位。

智能变电站故障信息模型对在线监测的支撑作用具体如图 2 所示。

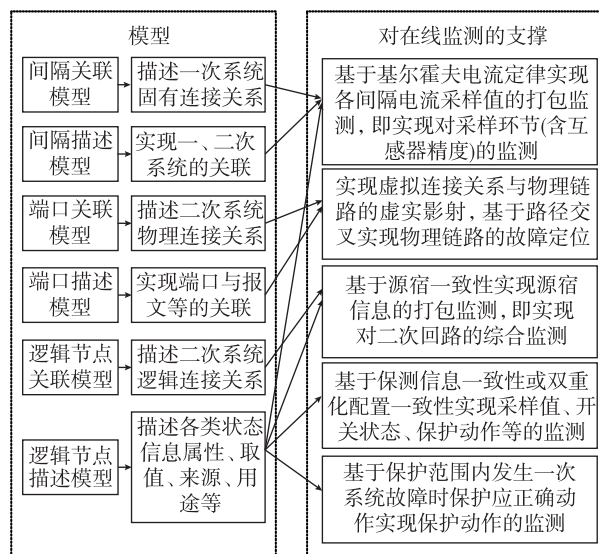


图 2 故障信息模型对继电保护在线监测的支撑

Fig.2 Support of fault information model for relay protection online monitoring

基于状态信息耦合与关联关系的继电保护在线监测方法对继电保护在线监测的指导意义主要如下: 可以实现变电站各间隔保护系统之间、双重化配置保护系统之间、保护系统内部各设备之间的继电保护状态打包监测。若打包监测结果无异常, 则可认为继电保护状态正常; 若打包监测结果有异常, 则可基于本文提出的在线监测与故障定位方法较精确地确定异常范围。

2.1 信息采集环节在线监测方法

结合间隔关联模型、间隔描述模型、逻辑节点描述模型可以实现智能变电站各间隔间电流采样值的整合与分析, 可实现各间隔电流采样值的打包监测, 具体分析方法如下。

根据逻辑节点描述模型中的集合 Z_{XCBB} , 定义一维列矩阵 $Z_{(b)k \times 1}$ 表示各间隔在母线 b 侧的开关状态, 取值为 1 或 0, 矩阵元素 $z_j = 1$ 表示开关合上, $z_j = 0$ 则表示开关断开。根据逻辑节点描述模型中字符串 $\{TCTR\}$, 读取方向系数 K_1 、变比系数 K_2 、电流值 I_j 。根据基尔霍夫电流定律, 以母线作为节点, 可得到各间隔间电流约束条件如下:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k x_{ij} K_1 K_2 z_j I_j = 0 \quad (8)$$

若以间隔为节点, 则同一间隔各侧采样值满足:

$$\sum_{j=1,2,\dots} K_1 K_2 I_j = 0 \quad (9)$$

除此之外,还可以利用双重化配置保护装置的采样值,实现双套保护信息采集环节的打包监测。

2.2 信息传输环节在线监测方法

2.2.1 二次回路通断监测方法

由端口描述模型(端口-逻辑节点/报文)可获得逻辑节点/报文进行信息交互所依靠的端口,并进一步根据端口连接模型(端口-端口)获取逻辑节点/报文间信息交互的路径,生成信息传输回路^[12]。

信息传输路径计算方法如图 3 所示。图中,矩阵 $S_{m \times p}$ 表示逻辑节点/报文与端口的对应关系,矩阵元素 $s_{se} = 1$ 表示第 e 个逻辑节点/报文信息流流向端口 s ,集合 P^e 表示第 e 个逻辑节点/报文信息流传输路径。

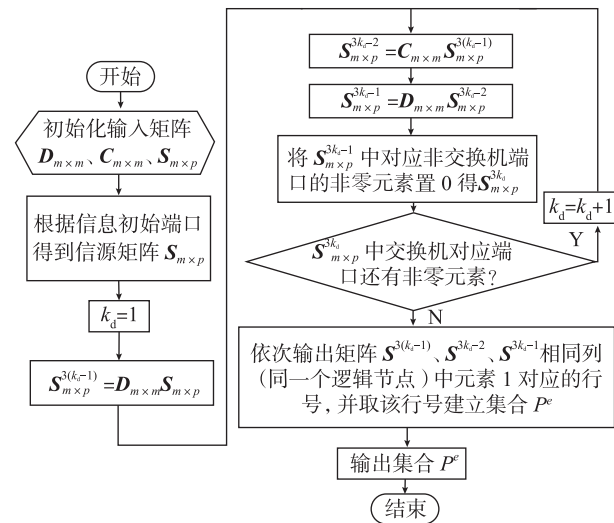


图 3 信息传输路径计算方法

Fig.3 Calculation method of information transmission path

根据图 3 中的方法可以得到每一个逻辑节点/报文信息流虚实回路中的传输路径 P^e , 路径的起点对应于传输信息的信源, 路径的终点对应于该信息的信宿, 利用信息流传输路径以及实时的异常告警信息可以推算错误信息的波及范围, 便于查找故障发生的位置。

当某个逻辑节点信息发生异常或报文断链故障时, 故障原因可能是信源异常、信道(端口、光纤、VLAN)异常或者是信宿异常。以逻辑节点信息异常为例, 信息传输路径故障诊断思路如图 4 所示。若 LN_1 信息发生异常, 而 LN_2 信息正常, 则故障应该发生在 $P^{LN_1} - (P^{LN_1} \cap P^{LN_2})$ 处, 即 ① 处, 反之则在 ② 处, 其中 P^{LN_1} 为 LN_1 信息经过的传输路径集合, P^{LN_2} 为 LN_2 信息经过的传输路径集合; 若 LN_1 和 LN_2 信

息均出现异常, 则故障应该发生在 $P^{LN_1} \cap P^{LN_2}$ 处, 即 ③ 处。当逻辑节点数大于 2 时, 故障诊断思路类似, 本文不再赘述。

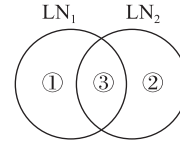


图 4 逻辑节点信息传输路径故障诊断思路

Fig.4 Management of fault diagnosis based on information transmission path between LNs

2.2.2 二次回路综合监测方法

基于信息传输路径源宿信息一致性原理, 结合逻辑节点关联模型与逻辑节点描述模型可以实现二次回路状态的综合监测, 可以辨别信息传输路径是否存在断链、丢包、误码等网络性能问题。

由于逻辑节点关联是基于某个信息的关联, 因此源宿信息一致性监测应按各类节点信息分别计算, 例如分别对采样值、开关值、动作值进行一致性监测。由于逻辑节点信息交互具有单向性(如采样值会单向从电流互感器内的逻辑节点 TCTR 传输至保护装置内带时限过电流逻辑节点 PTOC, 而不会反向传输), 故定义源端/宿端矩阵 $Y_{1 \times g} = [y_1, y_2, \dots, y_g]$ 同时表示源端/宿端实测信息, 矩阵 $Y_{1 \times g}$ 可由解析逻辑节点描述模型得到。再定义辅助判断矩阵 $F_{g \times g}$ 区分源端与宿端, 偏差矩阵 $\sigma_{1 \times g}$ 表示源宿信息偏差, 则有:

$$F_{g \times g} = \text{diag}(f_1, \dots, f_e, \dots, f_g) \quad (10)$$

$$f_e = \begin{cases} 2 & \text{当 } \sum_{j=1}^p n_{ef} = 1 \text{ 时, 表示宿端} \\ 1 & \text{其他, 表示源端} \end{cases}$$

$$\sigma_{1 \times g} = Y_{1 \times g} F_{g \times g} - Y_{1 \times g} N_{g \times g} \quad (11)$$

若信息传输正常, 则理论上源宿信息偏差矩阵 $\sigma_{1 \times g}$ 各元素绝对值均小于阈值 σ_{res} ; 若某信息传输路径存在断链或误码等现象, 则偏差矩阵 $\sigma_{1 \times g}$ 某元素绝对值偏离阈值 σ_{res} , 则该元素对应信息流传输路径异常。

2.3 核心保护环节在线监测方法

根据二次系统逻辑节点描述模型中各保护元件的信息, 可以实现保护元件启动/动作情况的监测, 具体分析方法如下。

假设研究对象中保护元件共有 n 个, 保护范围分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, 若保护元件保护间隔的全长, 则取 $\alpha = 1$ (通常 α 取值范围为 0 ~ 1)。假设故障跳闸后所研究对象故障测距结果为 l (取值范围为 0 ~ 1)。用矩阵 $R_{n \times 1}$ 表示各保护元件的理论启动状态

矩阵,则有:

$$\mathbf{R}_{n \times 1} = \text{SGN}([\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T - [l, l, \dots, l]^T) \quad (12)$$

$$\text{SGN}(x) = \begin{cases} 1 & \alpha_i - l \geq 0 \text{ (故障发生在保护范围内)} \\ 0 & \alpha_i - l < 0 \text{ (故障发生在保护范围外)} \end{cases}$$

用矩阵 $\mathbf{Q}_{n \times 1}$ 表示各保护元件的实际启动状态,用对角矩阵 $\mathbf{P}_{n \times 1}$ 表示各保护元件对应的功能压板状态,这 2 个矩阵均可以从逻辑节点描述模型中获得。用矩阵 $\mathbf{D}_{n \times 1}$ 表示各保护元件的启动状态偏移,则有:

$$\mathbf{D}_{n \times 1} = \mathbf{Q}_{n \times 1} - \mathbf{R}_{n \times 1} \cdot \mathbf{P}_{n \times 1} \quad (13)$$

其中,符号“ $\cdot$ ”表示矩阵对应行相乘。若各保护元件响应正确,则矩阵 $\mathbf{D}_{n \times 1}$ 为全零矩阵;若个别保护元件由于硬、软件故障而响应错误,则矩阵 $\mathbf{D}_{n \times 1}$ 有非 0 元素,因此可以通过搜索矩阵 $\mathbf{D}_{n \times 1}$ 中非零元素对应的行进行保护元件的故障分析。

除此之外,还可以利用双重化配置保护装置的保护启动/动作信息实现双套保护核心保护环节的打包监测。

3 算例

本文以 220 kV 智能变电站最小系统为例,验证本文所提模型、方法的正确性。系统示意图如图 5 所示,该变电站最小系统的一次系统包含 2 个 220 kV 进线间隔,1 个 110 kV 出线间隔,1 个变压器间隔以及高、低压侧各 1 条母线,图中方框内数字为间隔编号,⑤、⑥ 表示母线。

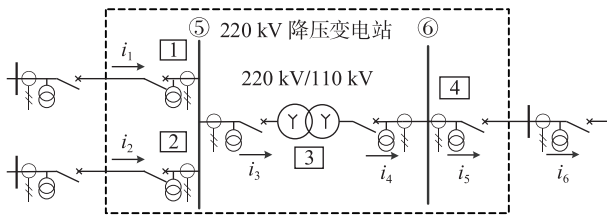


图 5 220 kV 智能变电站一次系统

Fig.5 Primary system in 220 kV smart substation

图 5 所示的变电站最小系统的继电保护系统如图 6 所示,图中黑色方框表示端口,空心方框表示 IED 或交换机设备。

基于上述模型定义,变电站最小系统对应的间隔关联模型为:

$$\mathbf{X}_{4 \times 4}^{(5)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{X}_{4 \times 4}^{(6)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

变电站继电保护系统间隔 1 对应的端口关联模

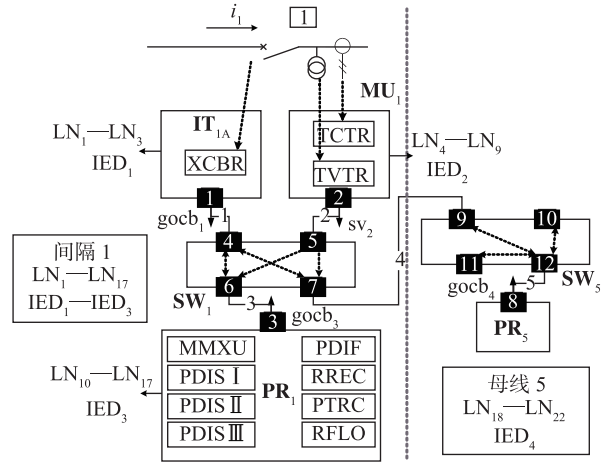


图 6 220 kV 智能变电站继电保护系统部分

Fig.6 Relay protection system part in 220 kV smart substation

型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{D}_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (15)$$

变电站继电保护系统间隔 1 (以 TCTR、MMXU 类逻辑节点为例) 对应的逻辑节点关联模型为:

$$\mathbf{N}_{3 \times 3} = \text{LN}_{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

变电站继电保护系统间隔 1 对应的报文与端口的关联模型为:

$$\mathbf{S}_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} \text{goch}_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \text{sv}_2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & \text{goch}_3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

a. 算例 1: 设置间隔 3 高压侧采样值异常。

基于间隔描述模型,从逻辑节点描述模型中可以读取 K_1 、 K_2 和 I_j ,结合间隔关联模型可得到:

$$\left\{ \begin{array}{l} |i_1 + i_2 - i_3| > r_{es1} \\ |0.5i_4 - 0.5i_5| < r_{es2} \\ |i_3 - 0.5i_4| > r_{es3} \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & |(i_1 + i_2 - i_3) + (0.5i_4 - 0.5i_5) + (i_3 - 0.5i_4)| = \\ & |i_1 + i_2 - 0.5i_5| < r_{es4} \end{aligned} \quad (19)$$

其中, r_{es1} 、 r_{es2} 和 r_{es3} 分别为母线 ⑤、间隔 3 和母线 ⑥ 的差动电流保护动作阈值; r_{es4} 为闭合面差动电流保护动作阈值。由式(19)可见, i_1 、 i_2 与 i_5 满足闭合面基尔霍夫电流定律, 因此母线 ⑤、⑥ 以及间隔 3 均无一次系统故障。而由式(18)可见, i_1 、 i_2 与 i_3 不满足基尔霍夫电流定律, i_3 与 i_4 不满足基尔霍夫电流定律, i_4 与 i_5 满足基尔霍夫电流定律, 因此可判断 i_3 异常, 即间隔 3 高压侧采样值异常。

b. 算例 2: 设置间隔 1 过程层网络端口 4 发生断链故障, 则此时 IED₃ 将报 goch₁ 断链故障, IED₁ 将报 goch₃ 断链故障。

结合端口关联模型, 根据图 3 所示的信息传输路径计算方法可以得出报文 goch₁、sv₂、gocb₃ 的信息流传输路径集合分别为:

$$P^1 = \{1, 4, 6, 3\}, P^2 = \{2, 5, 6, 3\}, P^3 = \{3, 6, 4, 1\} \quad (20)$$

根据报文断链告警信息, P^1 、 P^3 为异常路径集合, P^2 为正常路径集合, 因此根据式(21)可确定故障范围为端口 1、4 或者与其相连的光纤。

$$(P^1 \cup P^2 - P^2) \cap (P^3 \cup P^2 - P^2) = \{1, 4\} \quad (21)$$

c. 算例 3: 设置间隔 1 过程层网络中光纤段 2-5 异常导致报文 sv₂ 畸变, 则此时 LN₄ 与 LN₁₀、LN₄ 与 LN₁₈ 均存在源宿不一致现象。

结合逻辑节点关联模型, 可计算源宿信息偏差矩阵 $\sigma_{1 \times g}$ 如式(22)所示。

$$\begin{aligned} \sigma_{1 \times 3} &= S_{1 \times 3} F_{3 \times 3} - S_{1 \times 3} N_{3 \times 3} = \\ & (LN_4, LN_{10}, LN_{18}) \text{diag}(1, 2, 2) - \\ & (LN_4, LN_{10}, LN_{18}) N_{3 \times 3} = \\ & (0, LN_{10} - LN_4, LN_{18} - LN_4) \end{aligned} \quad (22)$$

此时 $|\sigma_2| > \sigma_{res}$ 且 $|\sigma_3| > \sigma_{res}$, 结合图 3 所示信息传输路径计算方法, 则 LN₄→LN₁₀、LN₄→LN₁₈ 传输路径的公共部分光纤段 2-5 发生故障的概率最大。

d. 算例 4: 间隔 4 保护系统配置三段式距离保护, 各段在本间隔的保护范围分别为 0.85、1、1, 各段保护功能压板均置 1。设置间隔 4 距一次系统 0.8 处发生故障, 则故障测距结果 $l=0.8$ 。设置距离保护 II 段功能异常, 则距离保护 I 段正常动作, III 段正常启动, 而 II 段未启动。基于上述计算分析方法有:

$$\begin{aligned} R_{3 \times 1} &= \text{SGN}([0.85, 1, 1]^T - [0.8, 0.8, 0.8]^T) = \\ & (1, 1, 1) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} D_{3 \times 1} &= (1, 0, 1) - (1, 1, 1) \cdot \text{diag}(1, 1, 1) = \\ & (0, -1, 0) \end{aligned} \quad (24)$$

由式(24)可见, 距离保护 II 段响应异常, 需进一步分析其异常原因。

4 结论

本文提出了面向继电保护在线监测的智能变电站故障信息模型, 刻画了继电保护系统在物理、逻辑、信息等不同维度下的关联及约束关系, 为开展基于系统特性的继电保护在线监测提供了新的途径。进一步地, 本文基于智能变电站继电保护故障信息的传递链条与关联约束, 实现了变电站各间隔保护系统之间、双重化配置保护系统之间、保护系统内部各设备之间的继电保护状态打包监测, 突破了传统面向单一设备检测的局限性, 充分体现了继电保护系统的整体状态及其有效性。

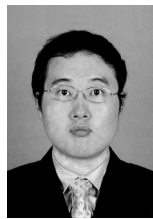
根据本文的模型与方法, 研发了新一代继电保护在线监测系统, 并已在广东电网某变电站投入试运行, 效果良好。

参考文献:

- [1] 王玉磊, 应黎明, 陶海洋, 等. 基于效能-成本的智能变电站二次设备运维策略优化[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 182-188.
WANG Yulei, YING Liming, TAO Haiyang, et al. Operation-maintenance strategy optimization based on efficiency-cost sensitivity analysis for secondary equipment of intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 182-188.
- [2] 鲁东海, 孙纯军, 王晓虎. 智能变电站中在线监测系统的设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 134-137.
LU Donghai, SUN Chunjun, WANG Xiaohu. Online monitoring system for smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 134-137.
- [3] 笃峻, 叶翔, 葛立青, 等. 智能变电站继电保护在线运检系统关键技术的研究及实现[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 163-168.
DU Jun, YE Xiang, GE Liqing, et al. Key technologies of online maintenance system for relay protections in smart substation and its implementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 163-168.
- [4] 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应用[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.
- [5] 盛海华, 赵纪元, 奚洪磊. 适应智能电网继电保护定值的在线管控方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 154-158.
SHENG Haihua, ZHAO Jiyuan, XI Honglei. On-line management and control scheme for relay protection settings of smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 154-158.
- [6] 叶远波, 孙月琴, 黄太贵, 等. 继电保护相关二次回路的在线状态检测技术[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 108-113.

- YE Yuanbo, SUN Yueqin, HUANG Taigui, et al. On-line state detection technology of relay protection relevant secondary circuits [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (23): 108-113.
- [7] 刘永欣, 师峰, 姜帅, 等. 智能变电站继电保护状态监测的一种模糊评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 37-41. LIU Yongxin, SHI Feng, JIANG Shuai, et al. A fuzzy evaluation algorithm for condition monitoring of smart substation relay protection [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 37-41.
- [8] 吴姜, 蔡泽祥, 胡春潮, 等. 基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 48-52. WU Jiang, CAI Zexiang, HU Chuanchao, et al. Status evaluation of protective relays based on the membership function in fuzzy normal distribution [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 48-52.
- [9] 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.
- [10] 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, 35(3): 538-548. 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, 35(3): 538-548.
- [11] 黄树帮, 叶留金, 袁宇波, 等. 电网继电保护及故障信息处理主站系统的设计和实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 88-92. HUANG Shubang, YE Liujin, YUAN Yubo, et al. Design and implementation of protective relaying and fault information processing master system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 88-92.
- [12] 张劲, 章坚民, 朱炳铨, 等. 220 kV 继电保护故障信息处理系统的设计[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 61-64. ZHANG Jin, ZHANG Jianmin, ZHU Bingquan, et al. Design of 220 kV relay protection and fault information system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(11): 61-64.
- [13] 韩平, 赵勇, 李晓朋, 等. 继电保护状态检修的实用化尝试[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 92-95. HAN Ping, ZHAO Yong, LI Xiaopeng, et al. Instantiation sample of relay protection state maintenance [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 92-95.
- [14] 笪峻, 张海宁, 柏杨, 等. 智能变电站设备状态监测系统通信关键技术及实现[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 151-156. DU Jun, ZHANG Haining, BAI Yang, et al. Key technology of communication and its implementation for equipment status monitoring system of smart substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 151-156.
- [15] 张延旭, 蔡泽祥, 龙翩翩, 等. 智能变电站通信网络实时故障诊断模型与方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1851-1857. ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, LONG Pianpian, et al. Real-time fault diagnosing models and method for communication network in smart substation [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1851-1857.
- [16] ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Analytical modeling of traffic flow in substation communication network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 2119-2127.

作者简介:



刘 琨

刘 琨 (1983—), 男, 河北邯郸人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为继电保护 (E-mail: tjulk@126.com);

黄明辉 (1965—), 男, 浙江余姚人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为继电保护 (E-mail: gdrelay@163.com);

李一泉 (1979—), 男, 江苏泰州人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为继电保护 (E-mail: Ee_lyq@yahoo.com.cn)。

Fault information model and online monitoring method for relay protection system in smart substation

LIU Kun^{1,2}, HUANG Minghui^{1,2}, LI Yiquan^{1,2}, CHEN Zhiguang^{1,2},
ZENG Genghui^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, SU Zhongyang³

(1. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;
2. Key Laboratory for Protective Relaying Real Time Digital Simulation of Guangdong Power Grid Co., Ltd.,
Guangzhou 510600, China; 3. Guangzhou Suihua Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 510530, China)

Abstract: Taking full advantages of open and shared information in smart substation, a new online monitoring method for relay protection is proposed based on the system characteristics of smart substation. The necessity of online monitoring for relay protection is comprehensively analyzed, and the management of online monitoring for relay protection is illustrated. In order to achieve the detailed description of the coupling relationship between state information of relay protection, automatic identification of the key state and location of the fault point, a fault information model for smart substation is formulated, which includes a primary system bay model, a secondary system port model and a secondary system logic model. Test results demonstrate that the online monitoring method based on fault information model for smart substation can accurately identify abnormal operation state information and fault locations.

Key words: smart substation; online monitoring; state messages; fault information model; relay protection