

DOI: 10.7667/PSPC180107

基于 Markov 模型与 GO 法的智能变电站继电保护系统实时可靠性分析

叶远波¹, 谢民¹, 王嘉琦², 徐岩², 徐殿洋³

(1. 国网安徽省电力公司电力调度控制中心, 安徽 合肥 230001; 2. 华北电力大学(保定), 河北 保定 071000;
3. 安徽继远软件有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘要: 智能变电站的全站信息数字化为继电保护信息的实时采集提供了基础, 但是智能变电站继电保护系统可靠性的分析还停留在滞后于实时运行状态的估算阶段。以智能变电站采集实时报文数据作为继电保护系统在线监测数据, 研究了继电保护装置的实时可靠性。首先从智能变电站在线监测出发, 对智能变电站报文进行分类, 确定继电保护装置的状态划分。然后通过 Markov 模型对继电保护装置的可靠性进行分析, 并根据多状态的特点, 使用 GO 法对继电保护系统可靠性进行分析, 实现了继电保护装置和系统的实时可靠性分析功能。最后以某变电站线路保护系统为算例, 证明了该方法为智能变电站保护系统实时可靠性的分析提供了有效手段。

关键词: 智能变电站; 继电保护系统; 实时可靠性; Markov 模型; GO 法

Real time reliability analysis of relay protection system in intelligent substation based on Markov model and GO method

YE Yuanbo¹, XIE Min¹, WANG Jiaqi², XU Yan², XU Dianyang³

(1. State Grid Anhui Electric Power Dispatch Center, Hefei 230001, China; 2. North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071000, China; 3. Anhui Jiyuan Software Co., Ltd., Hefei 230001, China)

Abstract: The digitization of total station information in intelligent substation provides the basis for real-time acquisition of relay protection information, however, the reliability analysis of relay protection system in intelligent substation remains in the estimation stage which is lagging behind the real-time operation state. This paper studies the real-time reliability of relay protection device by using the real-time message data of intelligent substation as the online monitoring data of relay protection system. First, from the online monitoring of intelligent substation, this paper classifies the message of intelligent substation and determines the state division of relay protection device. Second, the reliability of relay protection device is analyzed by Markov model, and GO method is used to analyze the reliability of relay protection system based on the characteristics of multimode so as to achieve the real-time reliability analysis function of relay protection device and system. Lastly, this method provides an effective means for the analysis of real-time reliability of intelligent substation protection system is proved by the example of a substation line protection system.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900203).

Key words: intelligent substation; relay protection system; real-time reliability; Markov model; GO method

0 引言

“坚强智能电网”概念的提出, 标志着国家电网公司对电力系统发电、输电、变电、配电、用电和调度六大环节的信息化、数字化、自动化和互动

化向“智能”发展的进一步要求^[1]。继电保护设备作为电力系统最重要的二次设备之一, 其基本要求是满足四性: 选择性、灵敏性、速动性和可靠性, 其中可靠性是所有要求的基础, 也是重中之重。

对继电保护可靠性的研究, 发展到现在已经有了大量的成果。在可靠性评估模型方面, 有故障树分析法^[2]、蒙特卡洛模拟法^[2-3]、最小路集法^[4-5]、可

可靠性框图法^[6]、变权系数法^[7]、神经网络相关算法^[8-9]和Markov模型分析法^[10-11]等。其中Markov模型分析法基于状态转移概率构建保护装置状态概率模型，由于其与继电保护装置状态机概念高度吻合^[12]，成为目前继电保护装置可靠性评估的主流方法。在可靠性数据获取方面，主要有基于实测数据的极大似然估计和最小二乘曲线拟合计算的恒定失效率^[13]，利用威布尔、正态等分布函数拟合对继电保护装置进行时变失效率估算及其区域性差异分析^[14]，上述方法都可以有效地估算继电保护装置的故障率，但是在智能电网技术高速发展的今天，继电保护装置信息已可以实时监测，实时的继电保护装置可靠性分析已经不再是遥不可及的事情。本文的目的在于通过对智能变电站在线检测数据的实时采集与分析，对信息进行分类，采用Markov模型实时计算出继电保护设备的动态可靠性。

1 实时数据获取

1.1 智能变电站报文数据

智能电网一般包含 6 个环节：智能发电、智能输电、智能变电、智能配电、智能用电和智能调度，而智能变电站的建设所占据的位置至关重要，也是建立坚强智能电网的重要一环^[15]。随着数字化变电站特别是智能变电站建设技术的成熟发展，采用 IEC61580 标准实现变电站二次设备三层两网的技术模式得到了广泛应用^[16-18]。ICE61850 系列标准^[19-23]是实现智能变电站互操作技术的前提协议标准，包括 MMS 协议的站控层与间隔层，以及面向通用对象事件(Generic Object Oriented Substation Event, GOOSE)报文和采样值(Sampled Value, SV)协议的间隔层与过程层，从而实现了全站的信息数字化、通信网络化、标准统一化和设备的在线监测等功能。

面向通用对象事件报文(以下统称 GOOSE 报文)，采用 ASN.1 编码规则，由一个发送方和多个接收方在链路层进行传输，采用发布者/订阅者模式。发布者/订阅者模式是发布者将所需发送的信息发送到发送缓冲区，由发送缓冲区统一整理发送到接收缓冲区，订阅者从接收缓冲区读取数据。这种模式尤其适合实时大量的一对多传输^[24]。

采样值报文(以下统称 SV 报文)，SV 报文与 GOOSE 报文一样从属于 IEC61850 9-2 的 T 协议子集，同样采用 ASN.1 编码规则与发布者/订阅者模式。SV 报文主要作用是根据设定的时间间隔传输

互感器测量的瞬间值。

这两种报文的应用实现了变电站的各项信息实时获取，为实现继电保护装置的智能状态监测的实现打下了基础，也为继电保护系统的可靠性计算提供了可能。

1.2 报文信息采集

变电站配置文件(Substation Configuration Description, SCD)是 SCL 描述语言生成的智能变电站系统配置最重要的文件类型，包含了智能变电站所有应用的 IDE 设备功能描述以及之间的通信系统、GOOSE 报文和 SV 报文的通信配置。SCD 文件与 GOOSE、SV 报文直接对应的是 Communication 和 IDE 两部分，在 Communication 中不同的报文类型被分配到不同的子网(SubNetwork)中，一般情况下，一个 Communication 模块中分配三个类型的子网，分别定义 MMS 报文、GOOSE 报文、SV 报文，在子网的下一级有多个接入点(ConnectedAP)，变电站的每一个设备的一类报文对应一个唯一的接入点。接入点的标签上有两个属性 apname 和 idname 分别对应接入点从属的子网类型和智能电子设备标识，在子网中每个接入点下可以有多个控制模块(GSE/SMV)，控制模块标签 IdInst 和 cbName 分别对应逻辑设备的实例标识和其逻辑节点内的控制块名称。SCD 文件与 GOOSE、SV 报文对应关系如图 1 和图 2 所示。根据两种报文与 SCD 文件的对应关系，使用 JAVA 语言编写程序依据变电站已配置好的 SCD 文件来实现继电保护设备报文信息的快速采集^[25]。

1.3 报文信息分类

在线监测的实现，可以及时获取变电站继电保护装置的变化信息，但是由于变电站继电保护装置数量庞大，每个保护装置又拥有多种信息，使得在可靠性分析时面对的数据量十分庞大。通过对大量实例报文的分析总结，本文将报文数据分为三大类，以便进行下一步分析，如表1所示。

表 1 报文信息状态分类

Table 1 Message status classification

报文信息类别	报文信息
保护设备品质差	SV 报文品质位异常...
保护设备异常	设备告警(报警)、设备异常、电压跌落、刀闸位置异常、数据无效...
保护设备故障	数据传输中断、设备位置无效、设备失灵、控制回路失点、设备掉线、链接断链、通信中断...

注：其中设备可能为具体设备的具体名称。

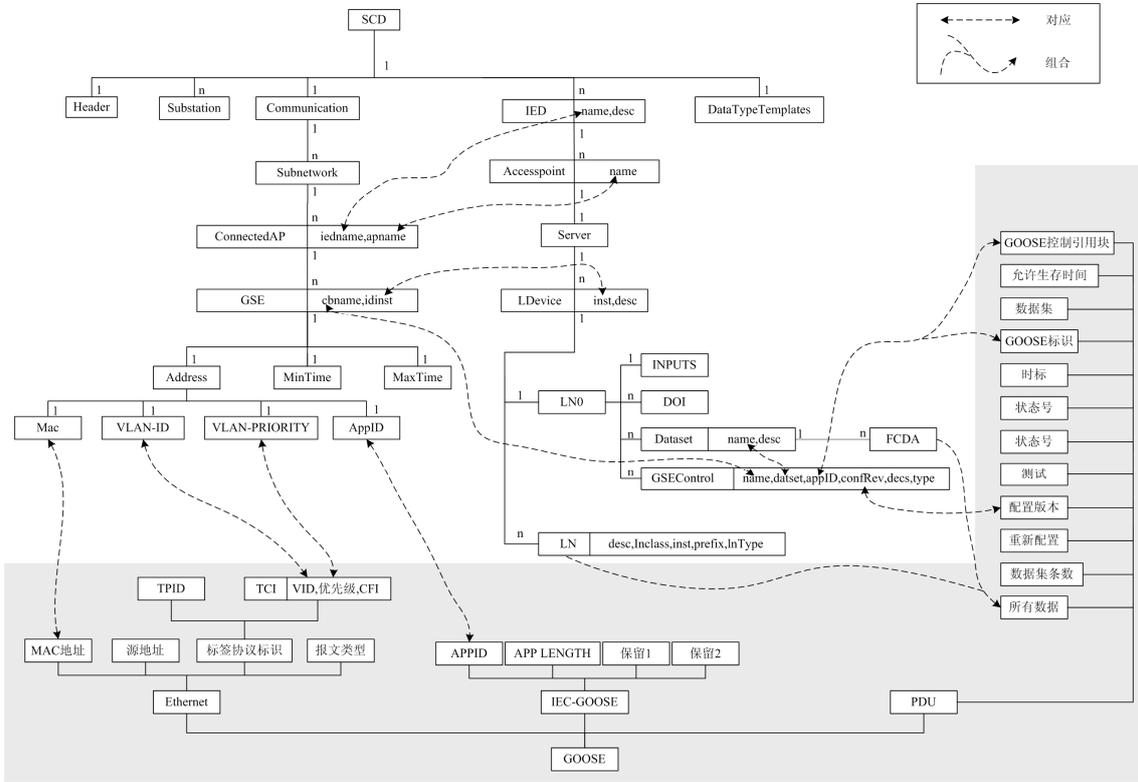


图 1 GOOSE 报文与 SCD 关系结构图

Fig. 1 GOOSE and SCD relation chart

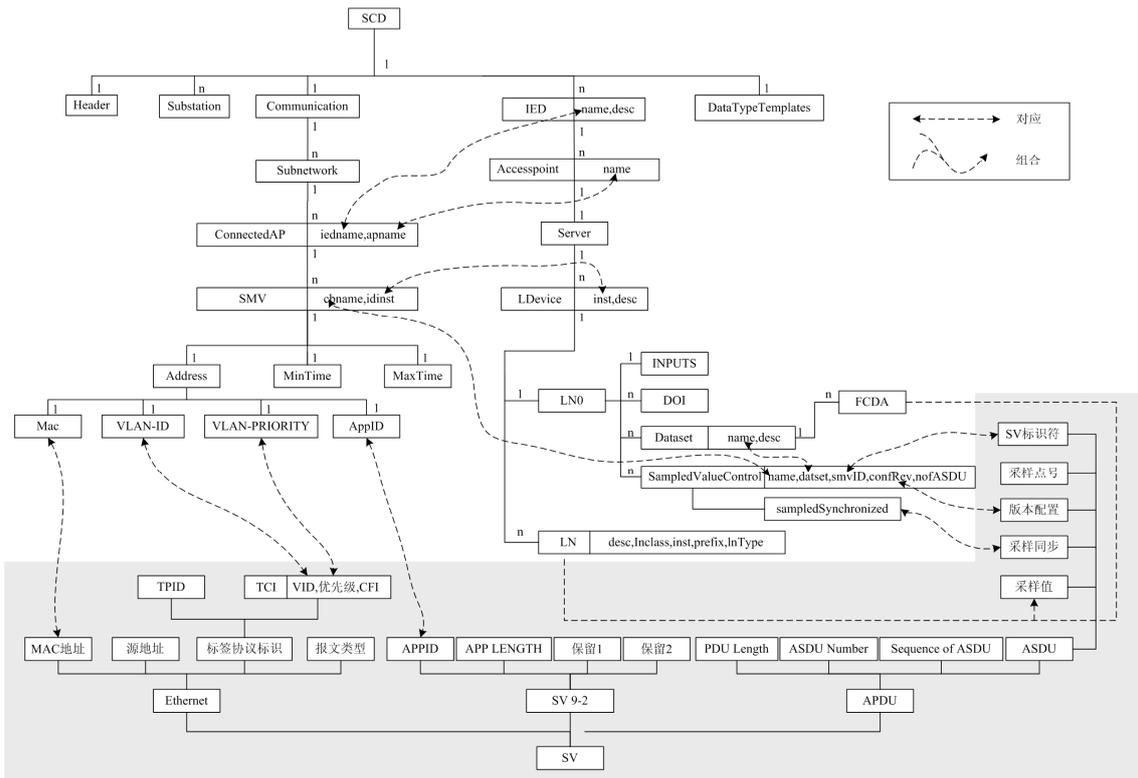


图 2 SV 报文与 SCD 关系结构图

Fig. 2 SV and SCD relation chart

2 继电保护系统可靠性模型

在获得保护设备报文信息之后, 首先对保护装置的状态进行划分, 使用 Markov模型计算出单一继电保护设备的实时状态概率分布, 然后根据保护系统结构图, 画出保护系统的GO图, 并结合保护设备可靠性数据使用GO法计算出继电保护系统状态概率分布。

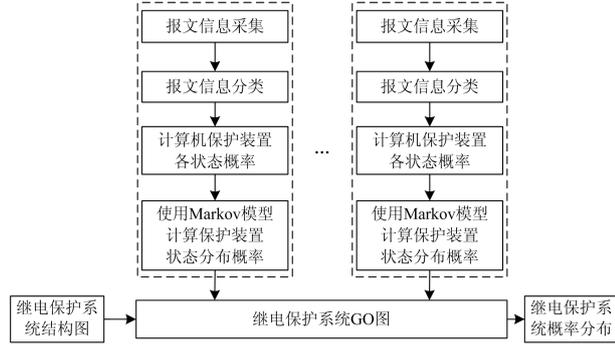


图3 继电保护系统状态概率分布流程图

Fig. 3 Relay protection system state probability distribution flow chart

2.1 继电保护设备可靠性

2.1.1 继电保护装置状态划分

通过对报文数据的归纳分类, 可将保护设备分为5种状态。

(1) 保护设备品质差被自检发现(状态1)。此状态表示继电保护装置的报文信息存在品质异常的情况, 原因有可能是网络传输导致的暂时性数据异常或者光CT/PT采集信息出现暂时性数据异常。

(2) 保护设备异常被自检发现(状态2)。此状态表示智能站内IED设备或网络交换设备监测到出现异常告警信息。

(3) 保护设备故障被自检发现(状态3)。此状态表示智能站内IED设备或网络交换设备监测到出现故障告警信息。

(4) 巡检发现异常(状态4)。此状态表示巡检人员发现继电保护装置异常, 而非保护装置自检发现, 没有在报文中显示出此故障信息, 此状态的加入主要是为了防止设备自检漏检发生。

(5) 保护设备正常工作(状态0)。此状态下, 保护处于正常工作状态。

其状态关系图如图4所示。将所发现的各种告警信息作为原始特征量, 采用与自检各类原始特征量相同的方法处理, 即将运行评价期间所发生各种原因次数之和/评价时间区域值 T_0 。其中, 修复率指各状态恢复到正常状态次数之和/评价时间区域值

T_0 , T_0 是指位累计运行时间。

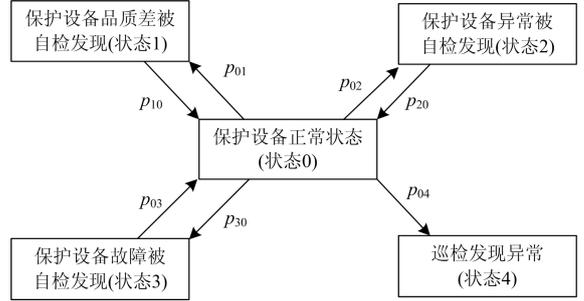


图4 继电保护装置状态关系图

Fig. 4 Relay protection device status diagram

保护设备品质差发生概率为

$$p_{01} = n_{01} / T_0 \quad (1)$$

保护设备异常发生概率为

$$p_{02} = n_{02} / T_0 \quad (2)$$

保护设备故障发生概率为

$$p_{03} = n_{03} / T_0 \quad (3)$$

巡检发现保护异常发生概率为

$$p_{04} = n_{04} / T_0 \quad (4)$$

保护设备品质差修复概率为

$$p_{10} = n_{10} / T_0 \quad (5)$$

保护设备异常修复概率为

$$p_{20} = n_{20} / T_0 \quad (6)$$

保护设备故障修复概率为

$$p_{30} = n_{30} / T_0 \quad (7)$$

式中: n_{01} 、 n_{02} 、 n_{03} 、 n_{04} 分别为保护设备品质差、保护设备异常、保护设备故障被自检发现次数和巡检发现异常次数; n_{10} 、 n_{20} 、 n_{30} 分别为保护设备品质差、保护设备异常、保护设备故障被自检发现后修复次数。

2.1.2 Markov 模型

Markov 链的无记忆性即当前历史状态对预测状态没有影响, 在继电保护可靠性分析中的应用十分普遍。根据 Markov 理论, 当 Δt 不变时, 对于有 n 个状态的状态空间, 其转移矩阵记为

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ p_{31} & p_{32} & \cdots & p_{3n} \\ p_{41} & p_{42} & \cdots & p_{4n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

转移矩阵数据关系如式(9)。

$$\begin{cases} p_{ij} \geq 0, i, j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (9)$$

根据实时监测评价阶段, 保护设备状态划分的

空间状态, 其转移矩阵可以描述为

$$P = \begin{bmatrix} 1-p_{01}-p_{02}-p_{03}-p_{04} & p_{01} & p_{02} & p_{03} & p_{04} \\ p_{10} & 1-p_{10} & 0 & 0 & 0 \\ p_{20} & 0 & 1-p_{20} & 0 & 0 \\ p_{30} & 0 & 0 & 1-p_{30} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

驻留矩阵为

$$A_i = \begin{bmatrix} q_0(i) \\ q_1(i) \\ q_2(i) \\ q_3(i) \\ q_4(i) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} P = [X(t_i) = e_0] \\ P = [X(t_i) = e_1] \\ P = [X(t_i) = e_2] \\ P = [X(t_i) = e_3] \\ P = [X(t_i) = e_4] \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

A_i 为继电保护设备 t_i 时刻的状态分布, 若继电保护设备初始状态为 A_0 , 在一般可靠性分析计算中由于初始量未知, 一般采用时间间隔数量趋于无穷时的平稳状态, 从而推导出状态矩阵和转移矩阵的关系并进行进一步求解。但是本文采用的实时监测系统可以实时得到继电保护设备的运行状态, 实时对转移矩阵和状态矩阵进行更新。驻留矩阵变比可以简单地理解为该状态持续时间与系统运行时间的比值, 即

$$A = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} P = [e_0 / T_0] \\ P = [e_1 / T_0] \\ P = [e_2 / T_0] \\ P = [e_3 / T_0] \\ P = [e_4 / T_0] \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

式中, e_0, e_1, e_2, e_3, e_4 分别为各状态。

当系统发生状态变化时, 对两个矩阵进行一次更新, 通过式(13)即可得到继电保护设备的实时状态概率。

$$\begin{cases} A = A \cdot P \\ q_0 + q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = 1 \end{cases} \quad (13)$$

2.2 继电保护系统可靠性模型

在对每一个继电保护装置的可靠性进行实时计算之后, 采用 GO 法对该智能变电站的某一个系统进行可靠性计算。GO 法是一种以成功为导向的系统概率分析技术, 它的基本思想是把系统图或工程图直接翻译成 GO 图。GO 图中用操作符代表具体的部件或者代表逻辑关系, 用信号流连接操作符, 代表具体的物流, 或者代表逻辑上的进程^[26]。

GO 法的主要步骤是建立 GO 图和进行 GO 运算, 其中最主要的元素是操作符和信号流。目前 GO

法已有 17 种操作符, 操作符主要分为逻辑操作符和功能操作符两大类。信号流是指单元的出入输出信号以及各单元之间的关联, 信号流将操作符连接起来得到 GO 图。信号流的属性分为状态值和状态概率两种, 例如说用 0 表示正常状态, 用 1 表示故障状态, 则 $P(1)$ 为故障发生的概率。对于多状态系统, 用 $0, 1, 2, 3, \dots, N$ 等 $N+1$ 个状态值来表示不同的状态, 其概率同样定义为 $P(0), P(1), \dots, P(N)$ 。状态概率计算公式为

$$P(0) + P(1) + P(2) + \dots + P(N) = 1 \quad (14)$$

本文使用的操作符包括第 5、10 类适用于多状态的操作符。由于本文通过从报文数据中得到的数据运用 Markov 模型首先计算合并单元、智能终端以及各种保护装置的可靠性。然后将这些装置的可靠性作为输入数据进行 GO 计算。所以本文将每个可以通过报文数据计算出可靠性的装置作为输入装置, 其输入即为该装置的状态概率分布。故以第 5 类操作符即单信号发生器代表继电保护系统中合并单元、智能终端以及各种保护装置等主要装置。以第 10 类操作符表示继电保护系统中主要装置之间的逻辑关系。

(1) 第 5 类操作符

无论在单一状态还是多状态系统中, 第 5 类操作符均为常用的操作符, 它没有输入, 是整个系统的输入, 独立于系统。其输出信号值为 V_R , 第 i 状态对应的概率为 P_R , 并且所有状态的概率和为 1。图 5 所示为一个包含 5 种状态的输出信号。

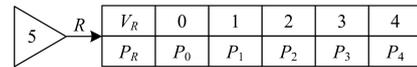


图 5 第 5 类操作符

Fig. 5 Class 5 operator

输出信号的状态累积概率为

$$A_R(i) = \sum_{j=0}^i P_R(j), i = 0, 1, \dots, N-1, A_R(N) = 1 \quad (15)$$

式中, $A_R(i)$ 表示输出状态数大于相应状态值 i 的状态概率, 引入状态累积量是为了更方便地表达逻辑关系公式。同样的输入信号的累积概率公式为

$$A_S(i) = \sum_{j=0}^i P_S(j), i = 0, 1, \dots, N-1, A_S(N) = 1 \quad (16)$$

(2) 第 10 类操作符

第 10 类操作符拥有多路输入信号, 仅有一路输出信号。类型 10 操作码是求出所有输入值的最大值传输给输出端。表 2 为 5 种状态情况下第 10 类操作符的逻辑关系。

表 2 第 10 类操作符输入输出逻辑关系

Table 2 Class 10 operator input and output logic

输入信号 S	设备状态	输出
任意	状态 0	S
0,1	状态 1	1
2,3	状态 1	S
0,1,2	状态 2	2
3	状态 2	3
0,1,2,3	状态 3	3
任意	状态 4	4

第 10 类操作符的算法为

$$V_R = \max \{VS_1, VS_2, \dots, VS_n\} \quad (17)$$

第 10 类操作符的概率表达式($n=5$)为

$$A(V_R) = \prod_{j=1}^5 A_{sy}(i), i=0,1,2,3,4 \quad (18)$$

以智能变电站基本结构为例,如图6所示,其中互感器将信号传送至合并单元,因为互感器在报文中的故障信息在合并单元的报文数据中显示,所以在绘制GO图时,将互感器与合并单元合并为一个模块;线路断路器的故障信息在智能终端的报文数据中显示,处理同上。最后画出该系统的GO图,如图7所示。

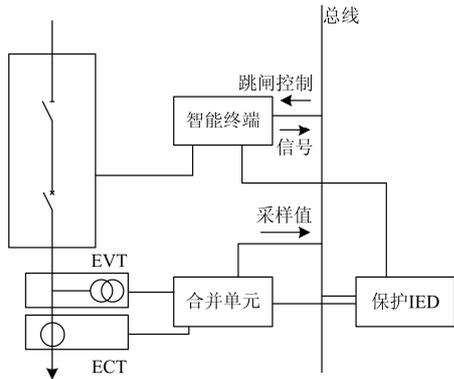


图 6 智能变电站基本结构图

Fig. 6 Basic structure of intelligent substation diagram

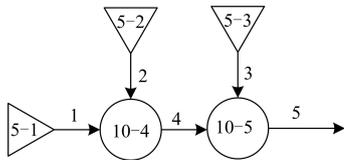


图 7 智能变电站基本结构 GO 图

Fig. 7 Basic structure of intelligent substation GO diagram

3 算例分析

以某智能变电站一段时间数据为基础,对该智能变电站的 220 kV 的线路保护系统进行可靠性分析。首先根据 SCD 文件分析该线路保护有关设备,

找出其对应的合并单元、智能终端、保护装置。其次对这 4 种设备的报文信息进行分类整合。对各状态的发生次数进行记录,其中状态 4(巡检发现异常)采集于现场数据。

以合并单元为例,首先将合并单元发出的报文输入到报文分析软件,同时将报文信息整理分类,进而得出本文所定义的各状态之间的转换概率。合并单元状态记录见表 3。

表 3 合并单元状态记录

Table 3 Merge unit status record

P_{01}	P_{02}	P_{03}	P_{04}	P_{10}	P_{20}	P_{30}
0.375	0.235	0.002	0.002	0.358	0.197	0.003

运用 Markov 模型,根据式(10)生成状态转移矩阵。

$$P = \begin{bmatrix} 0.386 & 0.375 & 0.235 & 0.002 & 0.002 \\ 0.358 & 0.642 & 0 & 0 & 0 \\ 0.197 & 0 & 0.803 & 0 & 0 \\ 0.003 & 0 & 0 & 9.997 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

然后对合并单元状态时间进行统计。合并单元状态时间见表 4。其中 e_0 、 e_1 、 e_2 、 e_3 、 e_4 分别对应 5 种状态在统计时间内的状态时间,以秒为单位。而在实际运行过程中,此状态时间是随运行时间实时变化的。

表 4 合并单元状态时间

Table 4 Merged unit status time

s					
e_0	e_1	e_2	e_3	e_4	合计
1 152 963	19 210	9 827	300	250	1 182 550

由表 4 中数据可以得到驻留矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} P = [0.97498] \\ P = [0.01624] \\ P = [0.00831] \\ P = [0.00025] \\ P = [0.00021] \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

$$\begin{cases} A = A \cdot P \\ q_0 + q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = 1 \end{cases} \quad (21)$$

通过式(21)计算出各状态的发生概率为: $q_0=0.9662$, $q_1=0.0249$, $q_2=0.0084$, $q_3=0.0003$, $q_4=0.0002$ 。

同理计算出其他设备的各状态概率,该线路保护各设备状态概率见表 5。

最后根据该线路保护结构画出结构图 8, MU1、MU2 分别为 220 kV 母线合并单元 1、2; PR1、PR2

为线路保护 1、2；IT1、IT2 位线路侧断路器智能终端。同时基于线路保护系统结构画出 GO 图(图 9)。

表 5 线路保护各设备状态概率

Table 5 Line protection equipment state probability

状态 概率	合并 单元 1	合并 单元 2	智能 终端 1	智能 终端 2	保护 装置 1	保护 装置 2
q_0	0.966 2	0.954 2	0.953 8	0.968 7	0.963 5	0.959 1
q_1	0.024 9	0.030 2	0.032 4	0.029 4	0.024 6	0.025 7
q_2	0.008 4	0.009 2	0.013 4	0.102 7	0.011 5	0.097 4
q_3	0.000 3	0.000 2	0.000 2	0.000 1	0.000 2	0.000 2
q_4	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2

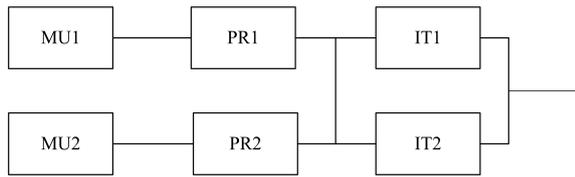


图 8 线路保护结构图

Fig. 8 Line protection structure diagram

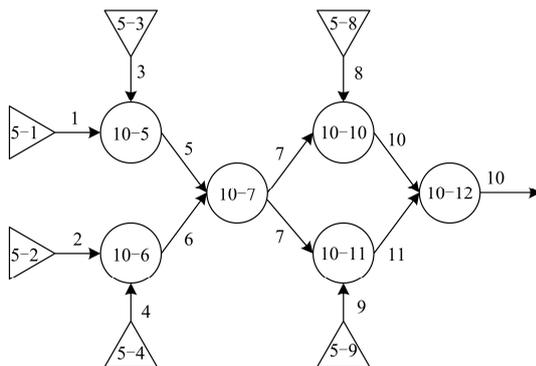


图 9 线路保护 GO 图

Fig. 9 Line protection GO diagram

表 6 线路保护操作符

Table 6 Line protection operator

操作符编号	类型	单元名称
1	5	合并单元 MU1
2	5	合并单元 MU2
3	5	线路保护 1
4	5	线路保护 2
5,6,7,10,11,12	10	与门
8	5	智能终端 1
9	5	智能终端 2

操作符号内前一个数字表示操作符的类型号，后一个数字表示操作符编号。将表 6 中设备的状态概率作为输入值，对应输入到 1,2,3,4,8,9 这 6 个操作符作为类型 5 的输入信号。按照图 7 通过 Matlab 运算后得出信号 12 的概率，即该线路保护系统的

状态概率为： $q_0=0.956 4$ ， $q_1=0.024 9$ ， $q_2=0.008 4$ ， $q_3=0.000 2$ ， $q_4=0.000 2$ 。

4 结语

本文从智能变电站在线监测系统的继电保护装置实时报文出发，分析了智能变电站 SCD 文件与报文之间的对应关系，并对反映继电保护装置状态报文进行采集和分类整理。同时分别从继电保护装置和系统两个层面对实时可靠性进行了研究。

(1) 在继电保护装置可靠性层面，对装备状态定义分类，使用 Markov 模型对进行可靠性分析，得到装置的实时状态概率分布。

(2) 在继电保护系统可靠性层面，根据继电保护装置多状态的特点应用 GO 法对继电保护系统实时可靠性进行求解，从而得出系统实时状态分布概率。

该方法使现场运行人员能够对继电保护装置及系统的运行状态有更加实时的反馈。不仅节约了时间，并且省去了繁杂且不甚准确的估计过程。该方法作为目前继电保护管理层分析可靠性成果的补充，对智能变电站继电保护系统可靠性的发展有一定参考价值。

参考文献

- [1] 冯军. 智能变电站原理及测试技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [2] BERESH R, CIUFO J, ANDERS G. Basic fault tree analysis for use in protection reliability[C] // Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, March 13-16, 2007, Clemson, SC, USA: 1-7.
- [3] 戴志辉, 王增平, 焦彦军. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 105-113.
- [4] DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun. Dynamic reliability assessment of protection system based on dynamic fault tree and Monte Carlo simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 105-113.
- [5] 王超, 王慧芳, 张弛, 等. 数字化变电站继电保护系统的可靠性建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 8-13.
- [6] WANG Chao, WANG Huifang, ZHANG Chi, et al. Study of reliability modeling for relay protection system in digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 8-13.
- [7] 刘洋, 马进, 张籍, 等. 考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 147-154.

- LIU Yang, MA Jin, ZHANG Ji, et al. Reliability evaluation of a new generation smart substation considering relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 147-154.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 何旭, 姜宪国, 张沛超, 等. 基于 SVM 的小样本条件下继电保护可靠性参数估计[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1432-1437.
- HE Xu, JIANG Xianguo, ZHANG Peichao, et al. SVM based parameter estimation of relay protection reliability with small samples[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1432-1437.
- [9] 戴志辉, 李芷筠, 焦彦军, 等. 基于 BP 神经网络的小样本失效数据下继电保护可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 129-134.
- DAI Zhihui, LI Zhijun, JIAO Yanjun, et al. Reliability assessment based on BP neural network for relay protection system with a few failure data samples[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 129-134.
- [10] 张雪松, 王超, 程晓东. 基于马尔可夫状态空间法的超高压电网继电保护系统可靠性分析模型[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 94-99.
- ZHANG Xuesong, WANG Chao, CHENG Xiaodong. Reliability analysis model for protective relaying system of UHV power network based on Markov state-space method[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 94-99.
- [11] 戴志辉, 张天宇, 刘譞, 等. 面向状态检修的智能变电站保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 14-21.
- DAI Zhihui, ZHANG Tianyu, LIU Xuan, et al. Research on smart substation protection system reliability for condition-based maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 14-21.
- [12] 侯昭武. 隐马尔可夫模型的拓朴应用[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 71-74.
- HOU Zhaowu. Hidden markov model topological application[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2009, 37(6): 71-74.
- [13] 薛安成, 王睿琛, 刘蔚, 等. 继电保护装置恒定失效率估算方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 6-10.
- XUE Ancheng, WANG Ruichen, LIU Wei, et al. Estimation methods for constant failure rate of protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 6-10.
- [14] 王睿琛, 薛安成, 毕天姝, 等. 继电保护装置时变失效率估算及其区域性差异分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 11-15.
- WANG Ruichen, XUE Ancheng, BI Tianshu, et al. Time-varying failure rate estimation of relay protection devices and their regional differences analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 11-15.
- [15] 呼文强, 陈博, 李颖瑾, 等. 智能变电站综合 IED 的研究与设计[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 83-87.
- HU Wenqiang, CHEN Bo, LI Yingjin, et al. Research and design of integrated IED for smart substation[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 83-87.
- [16] 刘譞, 李川. 基于多层次架构的继电保护在线状态评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 113-120.
- LIU Xuan, LI Chuan. An online evaluation method of relay protection operation state based on multi-level framework[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 113-120.
- [17] 肖繁, 王紫薇, 张哲, 等. 基于状态监测的继电保护系统检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 74-83.
- XIAO Fan, WANG Ziwei, ZHANG Zhe, et al. Study on maintenance strategy of relay protection system based on condition monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 74-83.
- [18] 刘世丹, 袁亮荣, 曾耿晖, 等. 一种基于 IEC 61850 统一建模的多智能变电站数据共享方案[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 109-112.
- LIU Shidan, YUAN Liangrong, ZENG Genghui, et al. Unified modeling data sharing plan for multi-intelligent substations based on IEC 61850[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 109-112.
- [19] 中国电力科学研究院. 变电站通信网络和系统 第 7-1 部分: 变电站和馈线设备的基本通信结构 原理和模型: DL/T 860.71—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- China Electric Power Research Institute. Communication

- networks and systems in substations part 7-1 basic communication structure for substations and feeder equipment principles and models: DL/T 860.71—2006[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [20] 中国电力科学研究院. 变电站通信网络和系统 第 7-2 部分: 变电站和馈线设备的基本通信结构 抽象通信服务接口(ACSI): DL/T 860.72—2004[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
China Electric Power Research Institute. Communication networks and systems in substations part 7-2: basic communication structure for substations and feeder equipment-abstract communication service interface: DL/T 860.71—2004[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [21] 国电自动化研究院. 变电站通信网络和系统 第 7-3 部分: 变电站和馈线设备的基本通信结构. 公用数据类型: DL/T 860.73—2004[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
Nanjing Automation Research Institute. Communication networks and systems in substations part 7-3: basic communication structure for substation and feeder equipment common data classes: DL/T 860.71—2004[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [22] 国电自动化研究院. 变电站通信网络和系统第 9-1 部分: 特定通信服务映射(SCSM)单向多路点对点串行通信链路上的采样值: DL/T 860.91—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
Nanjing Automation Research Institute. Communication networks and systems in substations part 9-1: specific communication service mapping (SCSM)-serial unidirectional multidrop point to point link: DL/T 860.91—2006[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [23] 国电自动化研究院. 变电站通信网络和系统 第 9-2 部分: 特定通信服务映射(SCSM)映射到 ISO/IEC 8802-3 的采样: DL/T 860.92—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
Nanjing Automation Research Institute. Communication networks and systems in substations part 9-2: specific communication service mapping (SCSM)-sampled values over ISO/IEC 8802-3: DL/T 860.92—2006[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [24] 刘世丹, 袁亮荣, 曾耿晖, 等. 基于同步功能改进的智能变电站区域保护系统[J]. 广东电力, 2017, 30(7): 35-39.
LIU Shidan, YUAN Liangrong, ZENG Genghui, et al. Regional protection system of intelligent substation based on synchronization improvement[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7): 35-39.
- [25] APOSTOLOV A. Efficient maintenance testing in digital substations based on IEC 61850 edition 2[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 407-420. DOI: 10.1186/s41601-017-0054-0.
- [26] 沈祖培, 高佳. GO 法原理和改进的定量分析方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(6): 15-19.
SHEN Zupei, GAO Jia. GO methodology and improved quantification of system reliability[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(6): 15-19.

收稿日期: 2018-01-23; 修回日期: 2018-04-05

作者简介:

叶远波(1973—), 男, 硕士研究生, 教授级高工, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: yeyb7079@ah.sgcc.cn

谢民(1975—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xiem261x@ah.sgcc.com.cn

王嘉琦(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: wjqncepu@qq.com

(编辑 姜新丽)