

DOI: 10.7667/PSPC170380

基于风险传递网络的智能变电站二次系统风险评估

王力军¹, 周凯², 吴迪¹, 刘刚³

(1. 湖北电力公司, 湖北 武汉 430000; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072;
3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 风险评估是运行管理中一项重要的工作。作为保障变电站安全运行的二次系统, 很有必要进行风险评估。从之前的研究中可以看出, 变电站二次系统风险评估难点在于二次设备数量多, 关系复杂, 难以统筹考虑, 二次设备对一次设备的影响作为主要风险难以量化。为此, 提出了风险传递和网络理论相结合的方法。风险评估分为两个部分, 一为自身风险评估采用网络理论求解, 另一部分为对一次系统的影响, 采用风险传递的方式求取。针对不同工作部门的需要, 提出了一套风险指标体系。最后采用一个实际运行的智能变电站二次系统验证该方法的正确性。

关键词: 二次系统; 风险评估; 风险传递网络; 敏感设备

Risk assessment for smart substation secondary system using risk transfer network model

WANG Lijun¹, ZHOU Kai², WU Di¹, LIU Gang³

(1. Hubei Electric Power Company, Wuhan 430000, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Risk assessment is an important task of operational management. It is necessary to carry out risk assessment in order to ensure the safe operation of substation secondary system. According to the past researches, the difficulties of its risk assessment include two parts, one is secondary devices are of high quantity and complex relationship, and difficult to consider comprehensively, another it is difficult to quantize the impact of secondary devices on primary devices as the main risk. To this end, a combination model of risk transfer and network theory is introduced. The risk assessment is decomposed into two parts: one is its own risk assessment which is solved using network theory, another is impact on primary system which is solved using risk transfer model. Then, a set of risk index system is presented according to the needs of different departments. Finally, a real smart substation secondary system is taken as an example to verify the correctness of this method.

This work is supported by Technical Transformation Project of State Grid Corporation of China (No. 26150515003c).

Key words: secondary system; risk assessment; risk transfer network; sensitive device

0 引言

变电站二次系统(Secondary System of Substation, SSOS)为变电站一次设备提供保护、调控、监视功能, 对其安全可靠运行起到了至关重要的作用。与此同时, 二次系统也给一次系统安全运行带来了许多不确定的因素, 近年来, 由电力二次系统故障造成的电力系统事故屡见不鲜^[1-3]。电力二次系统的安全稳定运行已经受到了广泛关注。

目前, 电力系统众多领域已开始了风险评估的研究和应用^[4-6], 针对二次系统的风险评估也开展了一些研究, 文献[7]对电力二次系统风险研究对象归纳为二次设备、信息安全和人为风险三个方面, 并指出未来二次系统风险评估的研究重点。在二次设备方面, 已有学者分析了继电保护系统^[8]、自动控制系统^[9]和二次系统软件^[10]失效造成的电力系统风险; 在信息安全方面, 文献[11-12]对电力信息安全的建模、风险评估方法以及信息安全管理等方面进行了深入分析。在文献[13-14]对人为风险进行定量分析, 研究了人为风险的影响因素及控制方法。上

述研究仅针对电力二次系统某一方面的故障造成的风险，而缺乏全局考虑。文献[15]提出了一种基于功能分解的变电站自动化系统安全风险评估模型，该模型是对二次系统整体进行风险评估的初探，具有很强的借鉴意义。但该模型在风险计算时，未考虑对一次设备的影响。综上所述，当前的研究模型存在两个问题：1) 二次设备种类繁多，功能复杂，难以统筹考虑；2) 二次系统的故障对一次设备的影响难以量化。

本文结合复杂网络理论和风险传递理论，提出了基于风险传递网络的二次系统风险综合评估模型，鉴于二次系统中各设备及功能的连通关系，定义风险网络元素，并考虑各网络元素之间的相互影响，构建二次系统风险传递网络，统筹考虑二次系统本身及其对一次设备的风险。此外，建立了一套二次系统风险指标体系，从运维人员关注的多个角度对二次系统风险进行量化分析。最后通过算例分析证明了本文算法的正确性和合理性。

1 风险传递网络

1.1 风险网络

随着变电站智能化的加快，变电站二次设备集成化、网络化已经成为发展趋势，智能变电站通过站内不同的网络层将二次设备联系成为二次系统，较常规变电站内的点对点接线方式，其设备之间的关联性更强，因此可以将二次系统看作一个网络，应用复杂网络理论来分析二次系统风险。首先对网络中的基本元素进行如下定义。

1) 节点

定义二次系统网络中的二次设备、组网为一个节点，记作节点 n 。节点包括“三层两网”内的所有二次设备和两个网络。

表 1 二次系统等效节点

Table 1 Equivalent nodes of secondary system

系统结构	等效节点
站控层	远动工作站、监控后台
间隔层	保护、测控、网络分析仪等
过程层	合并单元、智能终端
网络	包括交换机、电缆、集线器等设备，等效为一个节点

在站控层内，设备数量和种类较繁杂，而可靠性相对较高，根据其功能需求，站控层内设备可等效为两个节点，即远动工作站和监控后台。间隔层和过程层内的所有设备都等效为一个节点。对于两个组网，由电缆(或光纤)、集线器和交换机等设备组成，由于这些设备在功能上的一致性，可将两个

网络分别等效为两个节点。具体等效结果如表 1 所示。特殊的，互为备用的两个设备或网络，应等效为一个节点。

2) 主体

二次系统为一次系统提供了保护、调控和监测等功能，其中大部分的二次设备仅参与了一项系统功能，而随着二次设备功能集成化，许多二次设备开始参与多项功能，例如测保一体装置，既有保护功能，又有监测功能，因此将二次设备中参与二次系统基本功能的模块定义为主体。对于网络节点 n 上的保护功能模块构成的主体，记为 M_{n1} 。

3) 有向边

二次系统中每一项功能都是由多个主体共同完成，为了相互协作完成相应的功能，各主体之间通过一定的方式(有线或无线)进行信息交互，两主体之间进行信息交互的通道称为边。由于在实现不同功能时，信息流向不同，因此边是有向的，其方向与主体之间信息流向一致。则有，对于主体 M_{ai} 和主体 M_{bi} ，信息流向为 $M_{ai} \rightarrow M_{bi}$ ，记有向边为 $e(M_{ai}, M_{bi})$ 。

4) 主体集

定义参与完成二次系统某一功能的所有主体称为一个主体集，记作 S 。定义服务单个一次设备某一功能的主体集称为基本主体集，记作 S_1 。二次系统服务于一次设备的功能不仅有保护、测控等基础功能，而且包括备自投、低频低压减载等其他功能。

5) 度

定义一个节点或一个主体参与构成基本主体集的个数为度，分别称为节点度和主体度，记作 N_n 和 N_{M_i} 。节点度为该节点所有主体度之和。

1.2 风险传递

风险传递模型主要应用于金融行业，用来分析某一金融主体的风险，通过不同金融主体间的复杂关系传递给其他金融主体的过程。本文引入风险传递的概念用来描述二次系统中，二次系统的风险传递，由于单个主体的失效而造成其他主体失效的过程。

在二次系统中，存在一个主体 M_i 属于 S ，从系统运行的角度来说，若主体 M_i 发生故障，将会造成相邻主体 M_{i+1} 和 M_{i-1} 都无法完成其功能，使得主体集 S 无法实现其功能，由于主体集 S 无法完成相应功能，其服务的一次设备也因此会产生一定的风险。二次系统中的风险传递分为两个部分：一部分为主体风险传递给主体集，此部分的风险传递只发生在该主体所参与的基本主体集内，而不会传递给其他基本主体集，且风险传递是瞬时的，即一个主体发生故障，会瞬时导致整个基本主体集故障。这是由

于在一个主体集内部, 各主体在功能上是串联的。另一部分为主体集传递给一次设备。

根据以上定义建立一个如图 1 所示的二次系统网络, 在二次系统网络中, 存在三个节点 a 、 b 、 c 组成主体集 $S(M_{ai}, M_{bi}, M_{ci})$, 如图 1 所示, 其中节点 b 故障, 从运维人员的角度, 节点 b 的故障造成了节点 c 中主体 M_{ci} 无法完成其功能, 也会造成了节点 a 中主体 M_{ai} 无法完成其功能, 节点 b 的风险通过 $e(M_{ai}, M_{bi})$ 和 $e(M_{bi}, M_{ci})$ 传递给原本没有风险的节点 a 和 c 。因此, 二次系统中的风险会沿着边双向传递, 且风险传递只会发生在基本主体集内, 不会在不同的主体集之间传递。例如, 继电保护装置的保护主体风险不会传递给测控装置的测控主体。

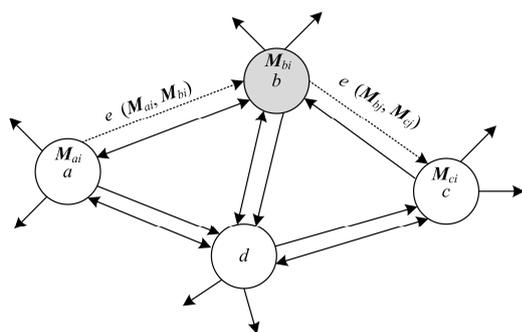


图 1 风险传递网络示意图

Fig.1 Schematic of risk transfer network

1.3 二次系统风险网络关联矩阵

二次系统中不同类型、型号的二次设备为一次系统提供了各类保护、控制、测量等服务, 二次系统的稳定运行直接关系到一次系统的安全, 本文在分析二次系统对一次系统的风险影响时, 仅对二次系统是否提供了相应基础服务功能进行分析, 而对服务的性能和效率未作进一步考量。基于此, 列写一、二次系统功能关联矩阵, 用以描述二次设备功能对一次设备的服务情况, 见式(1)。

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_m] \quad (1)$$

式中, \mathbf{Z}_i 描述针对第 i 个基本服务功能, 表示二次设备是否参与服务一次设备的情况, \mathbf{Z}_i 矩阵见式(2)。

$$\mathbf{Z}_i = \begin{matrix} & D_1 & D_2 & \cdots & D_l \\ a & \begin{bmatrix} z_{a1} & z_{a2} & \cdots & z_{al} \\ z_{b1} & z_{b2} & \cdots & z_{bl} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ n & \begin{bmatrix} z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nl} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

式中, 元素 z_{al} 表示二次设备 a 是否参与了一次设备

D_l 的服务功能 i , 实际上描述了主体 M_{ai} 是否参与了该服务, z_{al} 取值为 0 或 1, 分别表示未参与和参与。矩阵 \mathbf{Z}_i 有两个性质:

- 1) 矩阵的每一列中不为 0 的元素对应的主体构成一个基本主体集;
- 2) 矩阵的每一行中不为 0 的元素总数为主体 M_i 的度。

2 二次系统风险评估

2.1 二次系统风险评估模型

电力二次系统功能主体失效, 将导致无法保护、调控或监视对应的一次设备, 进而造成设备损坏、负荷损失等, 威胁电力系统安全稳定运行。二次系统的风险后果包括两个方面的内容: 二次系统自身的影响和对一次系统的影响, 可表示为

$$R = R_1 + R_2 \quad (3)$$

式中: R 为二次系统总风险; R_2 为二次系统自身风险, R_1 为二次系统风险造成对应一次系统的风险。又风险是风险概率与风险损失的综合^[16], 则式(3)可变为

$$R = CP = C_1 P_1 + C_2 P_2 \quad (4)$$

式中: C_2 为二次系统的本身的风险损失; P_2 为二次系统失效概率; C_1 为一次系统的风险损失; P_1 为二次系统风险造成对于一次系统失效的概率, $P_1 = P_2 \times P_{21}$, P_{21} 为二次系统失效造成一次系统异常的概率。则式(4)可化为

$$R = C_1 \times P_1 \times P_{21} + C_2 P_2 \quad (5)$$

2.2 风险指标体系与计算

在电力系统中, 不同单位或部门的运行人员对二次系统的关注各有侧重, 调度部门关注二次系统的整体风险情况, 检修部门更加关注单个设备的风险, 而运维部门则侧重于功能主体的风险, 因此, 针对不同职能部门的需求, 建立了如图 2 所示的二次设备风险指标体系。

2.2.1 主体级风险指标

主体级风险是二次系统功能主体失效后, 对二次系统本身和一次系统产生的影响。由风险传递概念可知, 任意一个主体失效, 将会沿着边传递给该主体集内的其他主体, 进而导致该主体集无法正常工作, 因此主体的风险评估实际上是对该主体所处的主体集进行风险评估。

1) 基本主体集风险指标

主体集最小单位是基本主体集, 由基本主体集定义可知, 一个基本主体集只对应唯一一个一次设备, 因此, 基本主体集的风险为该主体集失效对二

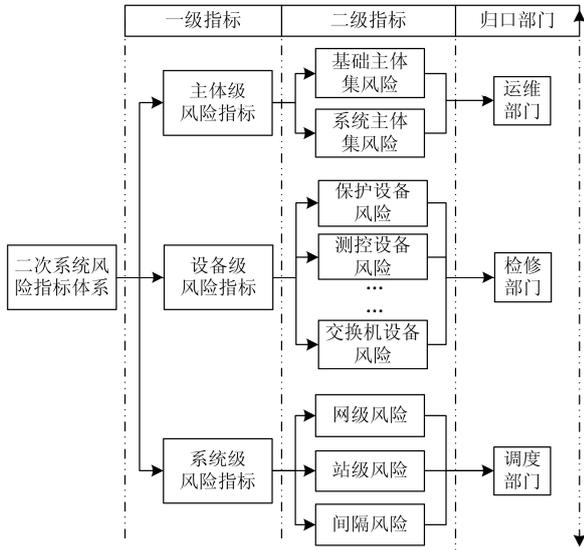


图2 二次系统风险指标体系

Fig.2 Risk index system for secondary system

次系统和对应一次设备的影响之和，则基本主体集 S_1 的风险为

$$R_1 = R_{11} + R_{12} \quad (6)$$

其中

$$R_{12} = \sum_{i=1}^n P_{Mi} \cdot C_{Mi} \quad (7)$$

式中： R_{12} 为 S_1 对二次系统造成的风险； n 为 S_1 中主体数； P_{Mi} 为 S_1 中第 i 个主体失效概率，可由功能主体对应的板卡或线缆的失效率求得，当两个主体相互备用时，将两主体并联等效为一个主体，此时 $P_{Mi} = P_{Mi1} \cdot P_{Mi2}$ ； C_{Mi} 为 S_1 中第 i 个主体失效后自身损失，其取值与设备的检修费用以及板件价值相关，可采用定额的方式进行量化^[17]。

$$R_{11} = P_1 \cdot C_{11} = P_1 \cdot P_1^D \cdot C_{11} \quad (8)$$

式中： R_{11} 为 S_1 造成对应一次设备的风险； P_1 为 S_1 失效的概率； P_1^D 为 S_1 失效造成对应一次设备 D 无法正常工作的概率； C_{11} 为一次设备异常造成的损失，与设备的恢复时间和运行容量等因素相关，本文按照文献[18-19]的方法进行量化。

由 2.2 节对风险传递的描述可知，第一部分的风险传递为主体向主体集传递的过程，且基本主体集内的各主体在功能上是串联的。则基本主体集风险概率为

$$P_1 = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{Mi}) \quad (9)$$

式中： n 为主体集内主体的个数； P_{Mi} 为基本主体集内第 i 个主体的故障概率，可由功能主体对应的板

卡或线缆的失效率求得，当两个主体相互备用时，将两主体并联等效为一个主体。

第二部分的风险传递为基本主体集风险向一次设备传递的过程，一个一次设备会对应多个基本主体集，且各主体集的功能不一，因此需要分析基本主体集风险对一次设备的传递效果，文献[20]中提出了一种风险传递模型量化两个相关事物之间的风险传递概率，计算公式为

$$P_1^D = 1 - e^{-\lambda\gamma} \quad (10)$$

式中： P_1^D 为风险传递概率； γ 为两事物之间的相关度； $\lambda > 0$ ，为传递概率调节参数， λ 值越小，风险传递发生概率越大。文献[21]提出了采用相关系数对两个变量的相关性进行量化，计算公式为

$$\gamma = \gamma(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

式中： γ 为相关系数， $|\gamma| \leq 1$ ，当 $|\gamma|$ 的值越大，则说明两个的相关程度越高，反之相关程度越低。其中， \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 分别为统一时间区段内，基本主体 S_1 和对应一次设备故障概率集。由此，式(6)可变换为

$$R_1 = \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{Mi}) \right) \cdot (1 - e^{\lambda\gamma}) \cdot C_D + \sum_{i=1}^n P_{Mi} \cdot C_{Mi} \quad (12)$$

2) 系统主体集风险指标

系统主体集是存在一定关联的多个基本主体集组合而成的，不同的基本主体集之间是不独立的，同一个主体可能参与了多个主体集的功能，而不同的主体集也可能服务同一个一次设备，因此，在计算系统主体集的风险时应当充分考虑这两点。

设系统主体集为 S_s ，则其风险可表示为

$$R_s = R_{s1} + R_{s2} \quad (13)$$

式中： R_{s1} 为该主体集对一次系统的风险； R_{s2} 为该主体集对二次系统的风险。其中

$$R_{s1} = \sum_{g=1}^l \max(R_{11}^{D_g}, R_{12}^{D_g}, \dots, R_{1k_g}^{D_g}) \quad (14)$$

式中： g 为该主体集 S_s 服务一次设备的个数； k_g 为服务第 g 个一次设备 D_g 的基础主体集数； $\sum_{g=1}^l k_g$ 为系统中总的基础主体数，应以其中最大风险作为的 D_g 的风险。

$$R_{s2} = \sum_{k=1}^m R_{1k} - \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n [(N_{ki} - 1)P_{Mki} \cdot C_{Mki}] \quad (15)$$

式中: R_{1k} 为第 k 个基础主体集 S_{1k} 的风险; N_{ki} 为第 k 个基础主体集中第 i 个主体的度, 同一个主体可能参与了多个主体集的功能时, 应除去重复考虑的部分。

2.2.2 设备级风险指标

在二次系统中, 每一个二次设备可能有多个功能主体, 参与多个基本主体集, 因此设备的风险是自身风险与其参与主体集对一次系统的风险之和。

设二次设备 a 的风险 R_a 为

$$R_a = R_{a1} + R_{a2} \quad (16)$$

$$R_{a2} = \sum_{i=1}^{N_a} P_{Mai} \cdot C_{Mai} \quad (17)$$

式中, N_a 为该二次设备 a 的节点度, 对一次系统的风险可由式(14)求得, $\sum_{g=1}^l k_g = N_a$ 。

2.2.3 系统级风险指标

由 2.2.1 节可知, 系统是由多个主体或主体集组成, 系统级风险可根据系统内主体集的风险综合求得, 一般情况下, 在同一变电站内的主体集之间会有一定的关联性, 不同的变电站之间的二次系统主体集可视为相互独立, 因此变电站内的风险指标可由式(14)和式(15)求得, 网级的风险指标为网内各变电站风险之和。

2.3 评估流程

基于风险网络模型的二次系统风险评估流程如图 3 所示, 具体步骤如下所述。

- 1) 构建待评估二次系统的风险网络, 列写网络功能关联矩阵, 划分基础主体集, 理清一、二次设备功能联结关系, 求解节点度、主体度等网络参数。
- 2) 进行基本主体集失效概率和损失分析, 分别对基本主体集对二次系统和一次系统的风险进行评估, 最终得到基本主体集风险 R_{1i} 。
- 3) 根据基本主体集风险, 求取系统级和设备级的其他风险指标。

3 案例分析

以湖北某 220 kV 变电站为例, 一次接线见图 4。本文仅考虑二次系统中保护、调控和监测三个主要的功能, 对其他的功能暂不作考虑, 由于篇幅原因, 仅给出了三个间隔的接线情况, 其他接线与此类似, 则变电站的一、二次接线如图 5 所示。按照 2.3 节所述的评估流程对该二次系统进行风险评估。

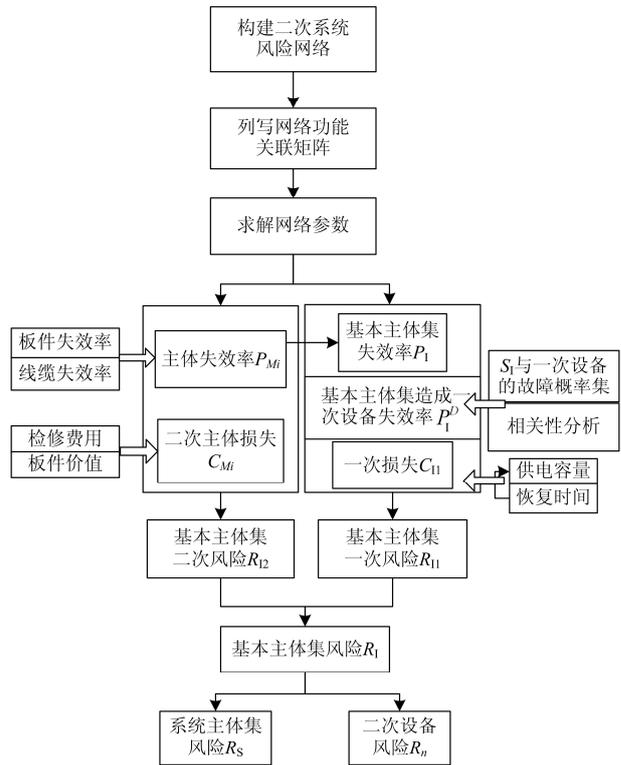


图 3 二次系统风险评估流程图

Fig.3 Flow chart of risk assessment of secondary system

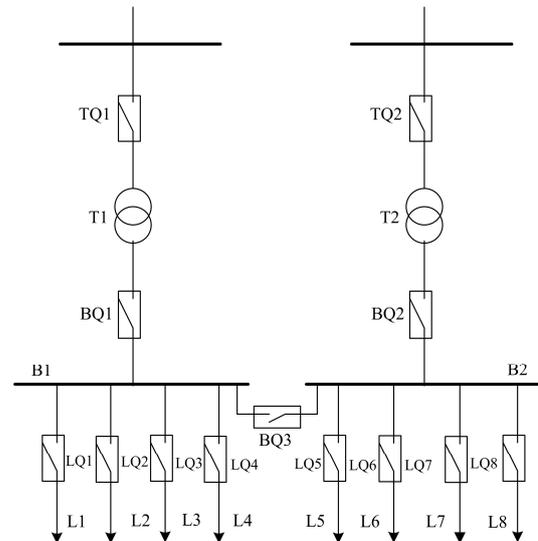


图 4 变电站一次接线图

Fig. 4 Substation wiring diagram of primary devices

对图 5 中的二次系统, 将每个二次设备等效为一个节点, 构建二次系统的风险网络如图 6 所示, 其中将过程层和站控层网络分别等效为节点 g 和 o , 网络分析仪为 h , 图中节点 $a-f$ 分别为过程层设备, 节点 $i-n$ 分别为间隔层的其他设备, 节点 p 和 q 分别为监控后台和远动工作站, D1-D3 为变压器、母

线和线路 L1。

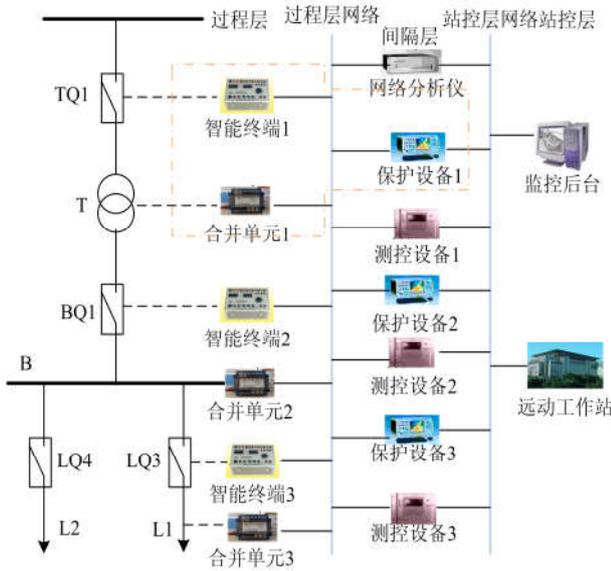


图 5 变电站一、二次系统接线图

Fig. 5 Wiring diagram of primary and secondary system of substation

D1 D2 D3 D1 D2 D3 D1 D2 D3

$$Z = [Z_1 \quad Z_2 \quad Z_3] = \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \\ i \\ j \\ k \\ l \\ m \\ n \\ o \\ p \\ q \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(18)

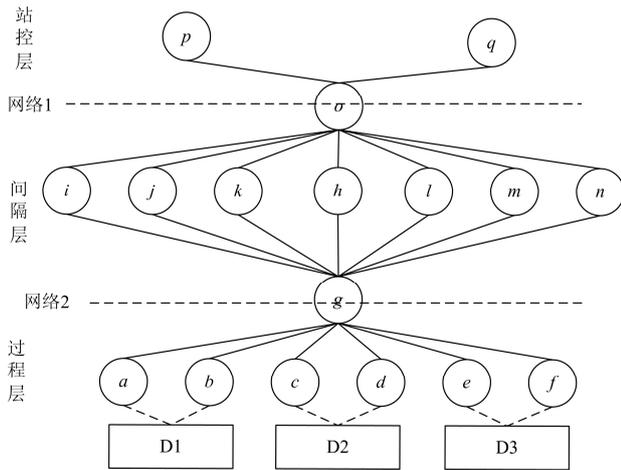


图 6 变电站一、二次系统等效风险网络

Fig. 6 Equivalent risk network of primary and secondary system of substation

对图列写网络功能关联矩阵如式(18), 式中 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为该系统保护、调控和监测三种功能主体的矩阵。分析功能关联矩阵得二次系统有 9 个基本主体集, 列于表 2 中。

1) 基本主体集风险评价

依据式(5)~式(9)计算出各基本主体集对一、二次系统的风险, 式中 C_{Mi} 和 C_{I1} 的取值由文献[17]和文献[18-19]分别求得, P_i^D 计算结果如表 2 所示。各主体的失效率见表 3, 风险计算结果见表 4。

表 2 基本主体集组成

Table 2 Constitution of basic principal set

编号	基本主体集组成	服务对象	功能	P_i^D
1	$M_{a1}M_{b1}M_{g1}M_{i1}$	D1	保护	2.37e-2
2	$M_{q1}M_{o1}M_{j1}M_{g2}M_{b2}$	D1	调控	3.19e-3
3	$M_{b3}M_{g3}M_{h1}M_{j2}M_{o2}M_{p1}$	D1	测量	1.25e-3
4	$M_{c1}M_{g1}M_{k1}M_{d1}$	D2	保护	1.84 e-2
5	$M_{q1}M_{o1}M_{l2}M_{g2}M_{d2}$	D2	调控	2.86e-3
6	$M_{d3}M_{g3}M_{h1}M_{l2}M_{o2}M_{p1}$	D2	测量	1.41e-3
7	$M_{e1}M_{g1}M_{m1}M_{f1}$	D3	保护	2.01e-2
8	$M_{q1}M_{o1}M_{n1}M_{g2}M_{f2}$	D3	调控	4.32e-3
9	$M_{j3}M_{g3}M_{h1}M_{n2}M_{o2}M_{p1}$	D3	测量	1.53e-3

表 3 二次设备失效率参数

Table 3 Failure rate parameters of secondary devices

设备名称	失效率	设备名称	失效率
合并单元 1	0.001 8	保护 1	0.001 4
智能终端 1	0.002 5	测控 1	0.001 2
合并单元 2	0.001 7	保护 2	0.002 4
智能终端 2	0.001 5	测控 2	0.001 3
合并单元 3	0.002 4	保护 3	0.001 7
智能终端 3	0.001 3	测控 3	0.001 5
网络分析仪	0.003 1	监控后台	0.002 4
过程层网络	0.002 4	智能远动机	0.001 4
站控层网络	0.001 6	调度主站	0.000 3

表 4 基本主体集风险评估结果

Table4 Results of risk assessment for basic principal set

设备类型	变压器 T			母线 B			线路 L1		
	保护	调控	监测	保护	调控	监测	保护	调控	监测
基本主体集	保护	调控	监测	保护	调控	监测	保护	调控	监测
二次风险/10 ³ 元	0.72	1.08	1.29	0.76	1.14	1.51	0.84	1.26	1.76
一次风险/10 ³ 元	102.62	56.24	15.83	97.73	48.64	11.42	25.17	13.87	6.95
总风险/10 ³ 元	103.34	57.32	17.12	98.49	49.78	12.93	26.01	15.13	8.71

由表 4 可知, 一次风险较二次系统风险要大很多, 在评估风险时, 二次系统自身风险可基本忽略。对于三个基本功能主体集, 保护功能主体集较调控和监测功能主体集的风险损失要大, 这是由于保护主体集失效导致一次设备失效的概率较大。而主体集服务的对象不同也会造成风险评估结果有所差异, 服务变压器和母线的主体集风险基本一致, 而服务于线路 L1 的主体集风险要小, 这是因为变压器和母线的故障会导致四条线路同时失效。

2) 节点风险评估

按式(16)、式(17)求得设备风险如图 7 所示, 由于设备 *g*、*h*、*o*、*p*、*q*、*r* 参与服务全站所有一次设备, 其风险损失应当考虑全站的情况。其中设备 *g* 参与了所有功能, 且服务于全站所有一次设备, 因此其风险最大, 高达 234 140 元。设备 *c* 和设备 *e* 具有相同的功能, 而分别服务于母线和线路 L1, 两者的风险较设备 *g* 要小, 又由于设备 *c* 的风险损失较设备 *a* 的风险损失要大, 因此两者的风险有所区别。设备 *i* 和 *j* 只服务于变压器, 其中设备 *i* 仅参与保护功能, 设备 *j* 参与调控和监测功能, 由于保护功能较调控和监测功能对一次设备的影响更大, 因此两设备的风险也不一致。由此说明了二次设备风险与节点度、服务一次设备数量以及参与功能主体类型有关。

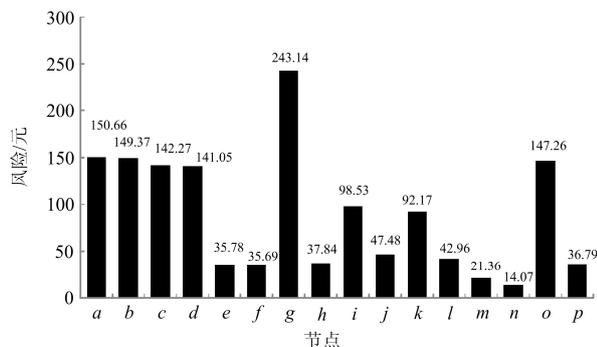


图 7 设备风险评估结果

Fig.7 Results of risk assessment for equipment

在该二次系统中, 系统网络、远动工作站, 以及部分过程层设备和保护设备的风险都超过 90 000

元, 与一般二次设备的价值(80 000~10 0000 元)相当, 因此需要重点关注。

3) 系统风险评估

三个间隔的风险及系统风险可由式(14)、式(15)计算求得, 结果如表 5 所示。为了进一步分析二次系统对一次设备的影响, 将一次设备自身的风险作为对比列于表中。由表可以看出二次设备造成的风险要小于一次设备自身的风险, 但这部分风险值不应该忽略。

表 5 一、二次间隔及系统风险

Table 5 Primary and secondary intervals and risk system

间隔	变压器	母线	线路 1	系统风险
二次系统风险/10 ³ 元	177.78	161.20	49.85	258.47
一次自身风险/10 ³ 元	11 517.4	10 396.2	2 589.2	17 502.8

4) 灵敏度分析

为了进一步分析二次系统中的薄弱环节, 找出系统风险影响的关键因素, 对该系统中的二次设备进行灵敏度分析。分析结果如图 8 所示。

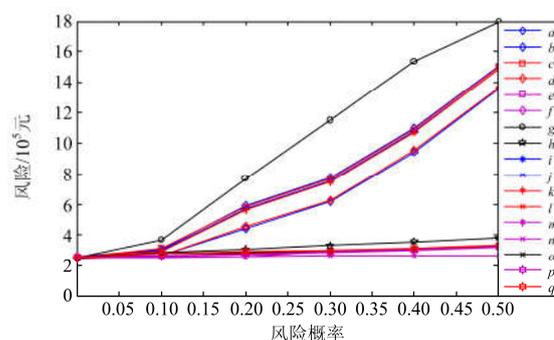


图 8 二次系统灵敏设备分析结果

Fig. 8 Analysis result of secondary system sensitive device

由图 8 可以看出, 系统的风险是随着设备的故障率增大而增大的。特别是 *a*、*b*、*c*、*d*、*g*、*i*、*k* 这七个设备(节点)的故障率增大时, 系统风险上升趋势明显, 因此此 7 个设备(节点)是该系统的敏感设备, 进一步分析发现, 这 7 类设备都参与了关键一次设备的保护功能, 由此可得, 在二次系统中, 参与关键一次设备保护功能的二次设备应当重点关注, 可采用冗余配置的方式控制二次系统风险。

4 结论

为了对二次系统运行风险进行评估, 本文提出了基于风险网络理论的二次系统风险评估方法, 统筹考虑二次系统对自身和一次系统的影响, 从系统、设备、功能主体三个层面对二次系统风险进行分析,

最后以实际算例验证了该方法的有效性,通过上述分析,得到如下结论:

1) 二次系统失效对自身产生的风险远小于其对一次系统的风险,在进行风险分析时,可对自身风险忽略不计。而二次系统对一次系统的影响风险较一次系统自身的风险要小,但不能忽略不计。

2) 二次设备风险与节点度、服务一次设备数量以及参与功能主体类型有关,节点度越大且服务的一次设备越多,风险越大。功能主体风险排序为:保护>调控>监测。

3) 参与关键一次设备保护功能的二次设备是二次系统风险的敏感设备,应当重点关注,并可采用冗余配置方式降低风险。

在变电站风险评估中,目前考虑的都是一次设备的风险,而忽略了二次系统影响,而本文的模型也仅考虑了二次系统的风险,如何统筹考虑一、二次设备对变电站进行总体的风险,需在后续工作中进一步完善。

参考文献

- [1] 刘念, 余星火, 张建华. 网络协同攻击: 乌克兰停电事件的推演与启示[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 144-147.
LIU Nian, YU Xinghuo, ZHANG Jianhua. Coordinated cyber-attack: inference and thinking of incident on Ukrainian power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 144-147.
- [2] US-Canada Power System Outage Task Force. US-force final report on the implementation of task forceCanada power system outage task recommendations[R]. 2006.
- [3] 国家电网公司安全监察质量部. 国家电网公司 2010 年安全生产事故报告[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [4] DAHLGREN R, LIUCC, LAWARREE J. Risk assessment in energy trading[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 503-511.
- [5] MARHAVILASP K, KOULOURIOTIS D E. Developing a new alternative risk assessment framework in the work sites by including a stochastic and a deterministic process: a case study for the Greek Public Electric Power Provider[J]. Safety Science, 2012, 50(3): 448-462.
- [6] FENG Yongqing. Power system operation risk assessment using credibility theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1309-1318.
- [7] 郭创新, 陆海波, 俞斌, 等. 电力二次系统安全风险评估研究综述[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 112-118.
GUO Chuangxin, LU Haibo, YU Bin, et al. A survey of research on security risk assessment of secondary system[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 112-118.
- [8] 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.
- [9] 冯永青, 吴文传, 孙宏斌, 等. 现代能量控制中心的运行风险评估研究初探[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 73-79.
FENG Yongqing, WU Wenchuan, SUN Hongbin, et al. A preliminary investigation on power system operation risk evaluation in the modern energy control center[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 73-79.
- [10] 韩宇奇, 郭嘉, 郭创新, 等. 考虑软件失效的信息物理融合电力系统智能变电站安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1500-1508.
HANYUqi, GUOJia, GUOChuangxin, et al. Intelligent substation security risk assessment of cyber physical power systems incorporating software failures[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1500-1508.
- [11] NORDSTROM L. Assessment of information security levels in power communication systems using evidential reasoning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1384-1391.
- [12] 伊洋, 刘育权, 陈宇强, 等. 基于信息综合判断的智能变电站网络通信故障定位技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 135-140.
YI Yang, LIU Yuquan, CHEN Yuqiang, et al. Research of network communication fault location technique in smart substation based on comprehensive information judgment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 135-140.
- [13] MARSEGUERRA M, ENRICO Z, MASSIMO L. Quantitative developments in the cognitive reliability and error analysis method (CREAM) for the assessment of human performance[J]. Annals of Nuclear Energy, 2006, 33(10): 894-910.

- [14] WANGAnsi, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Quantitative evaluation of human-reliability based on fuzzy-clonal selection[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(3): 517-527.
- [15] 郭创新, 俞斌, 郭嘉, 等. 基于 IEC 61850 的变电站自动化系统安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 685-694.
- GUOChuangxin, YU Bin, GUO Jia, et al. Security risk assessment of the IEC61850-based substation automation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 685-694.
- [16] 李文沅. 电力系统风险评估: 模型, 方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-2.
- [17] 国家电网公司. 电网设备检修成本定额[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 341-512.
- [18] 郑旭, 丁坚勇, 尚超, 等. 计及多影响因素的电网停电损失估算方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(1): 83-87.
- ZHENG Xu, DING Jianyong, SHANG Chao, et al. An assessment method of grid outage cost considering multifactorial influences[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(1): 83-87.
- [19] 袁修广, 黄纯. 计及故障停电经济损失的配电网风险评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8): 7-12.
- YUAN Xiuguang, HUANG Chun. Risk assessment of distribution network involving fault outage economic losses[J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2016, 28(8): 7-12.
- [20] FENGPinghui, LIAN Yifeng, DAI Yingxia, et al. Vulnerability model of distributed systems based on reliability theory[J]. Journal of Software, 2006, 17(7): 1633-1640.
- [21] 王开明, 束洪春, 曹立平, 等. 基于相关性分析的 OLTC 运行状态评价方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 54-59.
- WANGKaiming, SHUHongchun, CAOLiping, et al. Study of OLTC running state evaluation method based on correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 54-59.
-
- 收稿日期: 2017-03-17; 修回日期: 2017-05-27
- 作者简介:
- 王力军(1964—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统运行管理工作;
- 周凯(1991—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为二次系统风险评估与故障诊断; E-mail: dqzk@whu.edu.cn
- 吴迪(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护运行管理方面的研究。
- (编辑 姜新丽)