

面向智能变电站的信息流可靠性分析模型

孙卿亚, 李刚, 宋雨

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 智能变电站是智能电网可靠运行的关键环节和重要基础, 为避免变电站可靠性的单一确定性评估方法给变电站状态监测、检修决策带来的不足, 在分析智能变电站及其信息流特征的基础上, 从不同角度归纳了智能变电站网络可靠性的评估方法; 给出一种基于信息流传输时延、丢包率和各信息流 QoS 要求的信息流可靠性评估模型, 并通过在稳态和极限流量运行方式下对该模型进行了仿真实验, 结果表明该方法能在一定程度上定量评估智能变电站信息流的可靠性问题。

关键词: 智能变电站; 信息流; 可靠性分析

Reliability Analysis Model for Intelligent Substation Information Flow

Sun Qingya, Li Gang, Song Yu

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Intelligent substation is the key and important basis for reliable operation of the smart grid, based on analyzing the characteristics of intelligent substation and information flow, from different angles summarizes the assessment of intelligent substation network reliability, then an evaluation approach of intelligent substation information flow is presented based on its transmission delay, packet loss rate and QoS. And emulation under the steady-state and limit traffic mode, the results show this method can be used to evaluate the reliability of the information flow in the substation to a certain degree.

Keywords: intelligent substation; information flow; reliability analysis

0 引言

为了给用户提供安全可靠的电力供应, 解决用户在负荷需求与电能质量、经济发展与环境污染等方面的矛盾, 智能电网 (smart grid) 应运而生, 同时智能变电站 (smart substation) 概念也随即出现。智能变电站是智能电网的重要基础和关键环节, 其可靠性指标影响着整个电网的有效运行。智能变电站信息流承载着电流和电压采样值、开关位置等电网运行状态数据, 也承载了跳闸、闭锁和继电保护等指令数据, 是实现智能变电站各项业务的重要载体。因此, 提高信息流的可靠性是保证智能变电站各项功能业务稳定运行的关键。

例如, 在我国和欧盟等地区都根据各自国情制定了相应的智能电网发展战略规划。由于欧盟地区各国的自身限制, 使得电力系统和信息系统结合并不紧密, 导致其难以系统性的提出智能变电站的发展规划。而我国从发、输、变、配、用、调, 以及信息通信等环节考虑, 在全局角度系统地提出了智能变电站的愿景, 引领着智能变电站的快速发展, 为其适应性和兼容性提供了保障^[1]。

1 研究现状

变电站技术的发展是一个循序渐进的过程, 尤其是对其信息流的研究。在变电站信息集成方面, 文献 [2] 初步分析了变电站通信网络内信息流的分类特征, 为解决常规变电站信息传输延时、效率低下等问题, 给出了一种信息集成方案, 对变电站内的实体进行统一建模, 并构建高效的信息一体化平台。

在智能变电站网络特性方面, 文献 [3] 以 220 kV 变电站作为研究对象, 提出了一种基于间隔的 VLAN 划分方案, 对其中的主要数据流流量、通信时延及抖动进行了详细计算, 并对共网传输的数据流时延采用 OPNET 进行了验证, 对智能变电站的建设, 尤其是数据共网传输方式的推广应用有重要的参考价值。文献 [4] 为保证智能变电站信息流的可靠性和实时性, 提出了一种定质交换技术, 可以实现队列资源的合理分配, 传输路径的最佳选择, 确保重要信息流的传输符合 QoS 标准, 进一步保证了信息流的实时性和可靠性。

在变电站继电保护方面, 文献 [5] 以 500 kV 数字化变电站过程层网络为例, 通过设计过程层网络, 减少了数据冲突, 提高了网络带宽利用率, 保证了继电保护报文传播的实时性。文献 [6] 针对智能变电站数字保护领域的测试问题提出一套数字保护装置的自动测试平台。该平台的设计思路与传统的数字化保护测试有很大的不同, 采用分层结构和模块化思想, 开放式的结构和各种不同的保护装置, 实现高效率、可扩展、标准化的闭环自动测试。文献 [7] 基于模糊理论建立智能变电站继电保护状态评估体系, 并通过实例分析验证了该评估方法的有效性。文献 [8] 实现了对 500 kV 变电站主变压器、断路器智能输电设备运行状态各参量的全面监测、分析诊断,

收稿日期: 2015-09-21; 修回日期: 2015-10-09。

基金项目: 国家自然科学基金 (51407076); 河北省自然科学基金 (F2014502050); 河北省高等学校科学研究项目 (Z2013007); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2015ZD28)。

作者简介: 孙卿亚 (1989-), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事智能电网信息化管理方向的研究。

宋雨 (1958-), 男, 河北张家口人, 教授, 硕士生导师, 主要从事软件工程专业方向的研究。

以及故障定位和预警等功能。

综上, 国内外对智能变电站的研究已经开始了较长时间, 但目前还没有一套公认的有效的变电站网络安全评估方法, 对于智能变电站信息流的研究亦不多见, 因此, 对网络信息流可靠性的评估, 具有重要意义。

2 智能变电站信息流分析

2.1 智能变电站的特征

1) 一次设备智能化。数字化强调的是交换信息的技术手段, 而智能化强调的是在线监测等设备功能。

2) 二次设备网络化。传统的相互解耦、具体的二次接线由高度耦合、抽象的数据流所替代。

3) 符合 IEC61850 标准。基于 IEC61850 标准的变电站, 有效的提高了变电站内设备的互操作性和互换性, 却也存在着不少安全性问题, 于是提出解决这些问题的 IEC62351 标准。但是目前基于 IEC62351 标准的变电站还处于理论研究阶段^[9], 多数智能变电站还是基于 IEC61850 标准。

2.2 智能变电站信息流分析

在实际的变电站系统中, 往往将变电站分为三层模型和两层网络。三层模型分别为站控层、间隔层、过程层, 两层网络分别为站控层网络和过程层网络。将变电站中的信息流分为制造报文规范 (manufacture message specification, MMS)、面向对象的变电站事件报文 (generic object oriented substation event, GOOSE)、采样值报文 (sample measured value, SV) 和对时报文。信息流的传输方式如图 1 所示, 分为 6 种:

1) 变电站和远方控制中心之间的信息传输。主要包括遥测报文和遥控命令。

2) 变电站层设备之间的信息传输。主要是工作站的切换和调用其他设备等信息。

3) 变电站层和间隔层之间的信息传输。正常情况下主要是定时传输的少量信息流, 当有变电站事件发生时, 由故障引起的断路器和开关等设备状态变化信息要优先传输, 会引起信息流量的增加。

4) 间隔层设备之间的信息传输。这类数据流主要包括自适应继电保护、后备保护等信息流, 流量小, 出现的概率小, 但是实时性要求高。

5) 间隔层和过程层之间的信息传输。主要是间隔层内相关的信息交换。

6) 过程层设备之间的信息传输。这类信息主要包括 SV 报文、一次设备上传的状态和诊断信息、对时报文等。该信息流稳定连续, 流量大, 实时性高^[10-11]。

智能变电站过程层网络的引入, 使得系统在数据采集、传输、处理及输出过程与传统方式有很大差异, 通信过程的不透明性、通信延时的不确定性以及通信路径的不唯一性等一系列由网络通信带来的问题, 造成对信息实时性、安全性要求极高的继电保护的可靠性带来威胁。

对于智能变电站可靠性的研究, 也将不仅仅局限于物理拓扑的连通性层面, 还可以从信息流的连通可靠性上展开研究。因为传统继电保护技术的发展已相当成熟, 一般从原理、算法以及逻辑等方面均已采取了相应的检测与防范措施, 可靠性也比较高, 智能变电站中对继电保护冲击较大的就是过程层网络

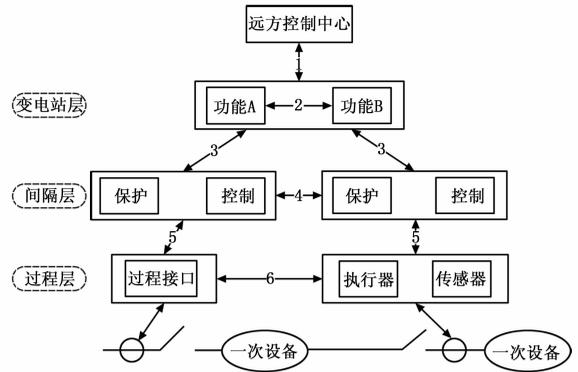


图 1 智能变电站信息流的传输示意图

通信的不可视性、不确定性。因此, 智能变电站中, 继电保护的可靠性可以表征为过程层网络信息流的可靠性, 而信息流的可靠性可以表征为信息流的连通性。以下对变电站的各种信息流进行详细的介绍。

1) GOOSE 信息流: GOOSE 报文承载的跳闸等控制命令关系到保护装置能否正确快速的判断电力系统的故障和异常状态, 并对之做出反应, 关系到整个电力系统的安全, 因此对网络的实时性、可靠性要求较高。GOOSE 报文采用心跳重发机制发送, 如图 2 所示, 在无变电站事件的情况下以固定周期 T_0 发送 (一般为 500 ms 或 1000 ms), 否则以 T_1, T_2, \dots, T_n 发送, 最后稳定在 T_0 。报文采用直接映射至链路层的非面向连接发布方/订阅者的传输机制, 并通常采用组播方式传输。

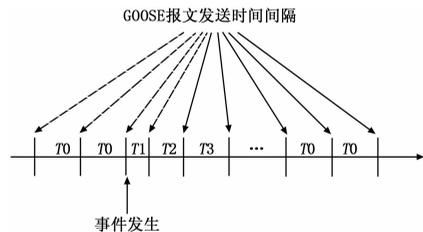


图 2 GOOSE 报文的重复机制

2) SV 信息流: SV 报文属周期性报文, 采集变电站中的电压电流等信号, 并将采集的信号传输给变电站的二次设备。SV 报文也采用发布方/订阅者的传输机制, 可采用组播和单播方式传输。

3) MMS 信息流: MMS 对各装置提供商的设备进行规范, 有效的解决了设备间的互操作性差的问题。MMS 采用“客户端/服务器”的传输机制^[12]。

3 可靠性评估模型

智能变电站网络的可靠性评估可以从很多方面研究。文献^[13]是从节点的可信度的角度研究的。首先节点之间进行交互, 获得每个与节点 i 交互的节点对该节点的评价, 称之为局部信任值; 并重新定义了节点 i 的全局信任值, 影响节点 i 全局信任值的因素较之前的推荐节点 k 的全局信任值和对节点 i 的局部信任值, 为了防止恶意节点的诋毁行为, 又增加两节点的贴进度。目前该方法还没有通过智能变电站网络的仿真实例来验证, 但这种方法不失为研究变电站网络可靠性的一种新

思路。文献 [14] 同样从节点角度出发，考虑电网和信息通信网双网耦合的特性，评估级联失效节点的重要度。每次移除一个电网节点，移除后可能会引起级联失效，导致邻近节点的负载率显著增加，整个网络的负载率下降。通过这两个值得变化程度来评估节点的重要度。文献 [15] 则从各设备的可使用年限和发生故障后恢复时间两方面考虑来评估组织形态的可靠性。通过计算得出某组织形态内所有设备的可用时间，用可用时间与可用时间加上恢复时间和的比值来表示该网络的可用度。

但以上研究并没有从智能变电站信息流可靠性的角度来评估变电站的可靠性。智能变电站对信息流的传输时延和丢失率都有很高的要求，本文在文献 [16] 的基础上，纳入智能变电站信息流的 QoS 要求和传输特性，建立了基于信息流动力学的智能变电站信息流可靠性评估模型。分别用 $Delay_G(t)$ 和 $Loss_G(t)$ 表示网络 G 在 t 时刻关于时延和丢失率的可靠性。在 t 时刻，智能变电站局域网 G 的性能可靠性表示如下：

$$\begin{cases} Delay_G(t) = \prod_{i=0, fi(t) \in G}^l e^{-fi(t) \cdot \frac{wi}{W}} \\ Loss_G(t) = \prod_{i=1, gi(t) \in G}^l e^{-gi(t) \cdot \frac{wi}{W}} \end{cases} \quad (1)$$

其中： $fk(t)$ 、 $gk(t)$ 、 W 分别为：

$$\begin{cases} fi(t) = \left(\frac{Dsi(t)}{Di(t)} \right)^2 \\ gi(t) = \left(\frac{Lsi(t)}{Li(t)} \right)^2 \\ W = \sum_{i=1, fi(t) \in G}^l wi \end{cases} \quad (2)$$

某特定的信息流时延、丢失率下的 QoS 要求分别表示为 $Di(t)$ 、 $Li(t)$ ，实际测试得到的信息流时延和丢失率分别表示为 $Dsi(t)$ 、 $Lsi(t)$ ，并给该信息流设置权重 wi 。 $fi(t)$ 、 $gi(t)$ 反应了 t 时刻网络传输信息流的时延和分组丢失率与 QoS 要求的差异程度。以传输时延为例分析， $e^{-fi(t)}$ 是递减函数。当信息流的传输不符合 QoS 要求，也就是 $Dsi(t) > Di(t)$ 时， $\left(\frac{Dsi(t)}{Di(t)}\right)^2 < \frac{Dsi(t)}{Di(t)}$ ，信息流的可靠性参数就会加速下降；当信息流的传输符合 QoS 要求，也就是 $Dsi(t) < Di(t)$ 时， $\left(\frac{Dsi(t)}{Di(t)}\right)^2 > \frac{Dsi(t)}{Di(t)}$ ，信息流的可靠性参数就会加速提高。由于智能变电站对于信息流的时延与丢失率的要求较高，因此在式 (2) 中采用平方来放大差异程度，以更好地反应变电站网络传输信息流的质量水平。由于式 (2) 中的 $Li(t)$ 位于分母的位置，不能为 0，对于 QoS 要求不允许丢包的信息流假设其 $Li(t) = 0.001$ 。

4 案例分析

本文使用 OPNET 软件验证所给出的智能变电站信息流可靠性评估方法。图 3 所示为网络拓扑结构，该站包括变电站层设备（工程管理和站控单元）和 6 个间隔（变电站间隔 T1、T2，馈线间隔 F1-F3，母线间隔 S）。右上角为子网馈线间隔 F1 的拓扑结构。其中每个馈线间隔包括 1 个合并单元、2 个执行器（断路器和智能开关）、1 个间隔控制器和 1 个间隔保护；母线间隔包括 1 个合并单元、1 个断路器 IED 和间隔控制

器；每个变压器间隔包括 1 个合并单元、2 个断路器 IED、1 个间隔控制器和 1 个间隔保护。

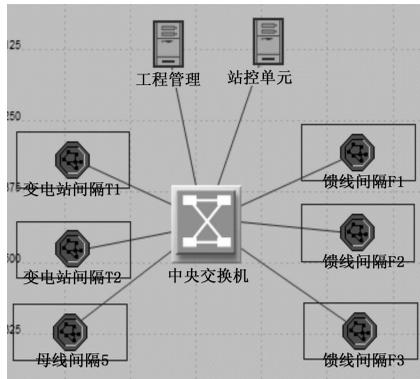


图 3 智能变电站的网络拓扑结构

利用仿真软件 OPNET 得到信息流的实时传输时延和丢失率，该信息流的 QoS 要求可通过 IEC61850 获得。根据智能变电站信息流的特点，选取稳态和极限流量相结合的运行方式进行评估。仿真结果如图 4 所示。处于稳态运行方式下的 SV 和 GOOSE 信息流都是周期性报文，流量较小，在仿真的前 30 s，仿真模型一直处于没有变电站事件发生的稳态运行状态，可靠性较高且稳定。随后设定 GOOSE 信息流处于持续突发的状态，此时变电站信息流量突增，并一直处于极限流量状态。由图 4 可见，随着流量的持续增加，信息流的可靠性逐渐下降，极限流量状态下的可靠性评估模型可以反应智能变电站网络节点和链路所能承受的最大流量。

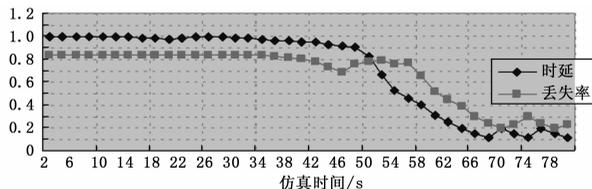


图 4 评估模型

5 结论

本文分析了智能变电站信息流的特征，给出了一种基于智能变电站信息流的传输时延和丢失率的可靠性评估模型，并验证了该评估方法的有效性，可对智能变电站信息流的可靠性评估提供参考。该模型主要针对变电站的信息流评估，当用于其它信息流评估时，应当根据实际情况进行改进。

参考文献：

[1] 樊 陈, 倪益民, 申 洪, 等. 中欧智能变电站发展的对比分析 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (16): 1-15.
 [2] Xue C, Huang X, Zhang Z. The information integration scheme of intelligent substation [A]. 2011IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE) [C]. IEEE, 2011, 2: 361-365.
 [3] 徐春霞, 张艳霞, 葛跃田. 智能变电站过程层网络数据流的分析与研究 [J]. 中国电力, 2013, 46 (8): 153-159.
 [4] 王海柱, 蔡泽祥, 张延旭, 等. 提升智能变电站信息流实时性和可靠性的定质交换技术 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34 (5): 156-162.

$$\begin{cases} (2n_0 - 1)(2n_0 - 2) + 1, & \textcircled{1} \\ \left[(2n_0 - 1)(2n_0 - 2) + 1 - (2n_0 - 2) \right] & \textcircled{2} \\ \left[(2n_0 - 1)(2n_0 - 2) + 2 - (2n_0 - 2), \right. \\ \left. (2n_0 - 1)(2n_0 - 2) + 2 - 2(2n_0 - 2) \right] & \textcircled{3} \\ \left[(2n_0 - 1)(2n_0 - 2) + 3 - 2(2n_0 - 2), \right. \\ \left. (2n_0 - 1)(2n_0 - 2) + 3 - 2(2n_0 - 2) - (2n_0 - 1) \right] & \textcircled{4} \\ \left[(2n_0 - 1)(2n_0 - 2) + 4 - 2(2n_0 - 2) - (2n_0 - 1), \right. \\ \left. (2n_0 - 1)(2n_0 - 2) + 4 - 2(2n_0 - 2) - 2(2n_0 - 1) \right] & \textcircled{4} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} [4n_0^2 - 6n_0 + 3, 4n_0^2 - 4n_0 + 1] & \textcircled{1} \\ [4n_0^2 - 4n_0 + 2, 4n_0^2 - 2n_0] & \textcircled{2} \\ [4n_0^2 - 2n_0 + 1, 4n_0^2] & \textcircled{3} \\ [4n_0^2 + 1, 4n_0^2 + 2n_0] & \textcircled{4} \end{cases}$$

判断 $m \in$ 上述 4 组区间的哪一组, 每一组区间对应平台移动坐标,

$$\begin{cases} m \in \textcircled{1}, \text{则移动坐标为}(1, 0); \\ m \in \textcircled{2}, \text{则移动坐标为}(0, 1); \\ m \in \textcircled{3}, \text{则移动坐标为}(-1, 0); \\ m \in \textcircled{4}, \text{则移动坐标为}(0, -1); \end{cases}$$

以上计算过程即为螺旋定位法的具体实现, 根据算法结果, 在程序的相机视图类 CCdView 中, 结合电机控制类 CMotorControl 对象, 加入此算法程序^[6]。

3 结论

BTZ-3100 型自动探针台加上螺旋定位法晶圆上片调平后到找到特殊点的过程如图 4 所示, 图 4 (a) 为起始视野, 在此视野中没有找到特殊点, 图 4 (b) 为平台根据螺旋定位法轨迹运行至某处的视野, 在此视野中仍然没有找到特殊点, 继续按照程序设定轨迹运行, 图 4 (c) 为目标视野, 视野中右下方开始出现特殊点, 立刻匹配上模板, 把特殊点移至预定位置, 接下来, 平台按照特殊点与第一点之间的固定运动轨迹, 最终使第一个晶粒 (第一点) 移至探针正下方。

BTZ-3100 自动探针台在显微镜相机的辅助下, 加上螺旋定位法后, 定位至第一点的过程平均用时不超过 0.4 s (与视野放大倍数相关), 而之前人工操作平均用时为 10 s, 显然, 第一点定位速度加快, 效率更高。螺旋定位法在 BTZ-3100 型自动探针台上经过多次试验, 并在交付客户使用中, 此自动定位部

(上接第 260 页)

[5] 方晓洁, 季夏轶, 卢志刚. 基于 opnet 的数字化变电站继电保护通信网络仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (23): 137-140.

[6] 张晓莉, 刘慧海, 李俊庆, 等. 智能变电站继电保护自动测试平台 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (18): 1-7.

[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: 37-41.

[8] 段哲民, 王海涛, 司伟. 智能变电站故障识别系统的研究与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (2): 318-361.

[9] 杨继高, 陶文伟, 张静, 等. 符合 IEC62351 标准的变电站原型系统关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (14): 114-119.

[10] 赵建利. 智能变电站通信系统的实时性和可靠性研究 [D]. 河北: 河北工业大学, 2012.

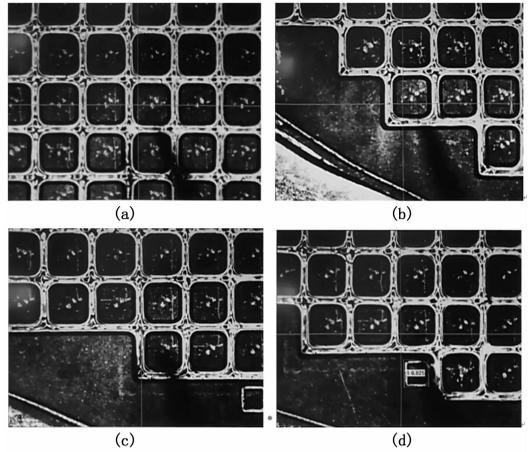


图 4 BTZ-3100 探针台找到特殊点过程图

分运行平稳, 且在长时间运行的情况下, 没有出现异常。

探针台操作中, 占用人力资源最多的步骤在于晶圆上片到第一点对准完成这一流程, 所以此自动定位法的运用, 在很大程度上又降低了人力成本。更值得一提的是, 在机器视觉的帮助下, 平台把第一点移至探针下方的精度将比人为操作找准定位精度更高, 也可避免工人用眼疲劳。

在此螺旋定位法的基础上, 还可发展成为 n 晶粒模板的螺旋定位法, 平台步进距离相应的也变成 n 倍, 运用此改进型的螺旋定位法, 速度将会更快。

参考文献:

[1] 张晓生. 机器视觉在全自动探针台中的应用 [D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2008, 12.

[2] 张小龙. 基于机器视觉的探针自动定位测试系统研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014, 5.

[3] 罗和平. 数字 IC 自动测试设备关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008, 4.

[4] 郑阿奇, 丁有和, 郑进, 等. Visual C++ 实用教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.

[5] 谭立杰, 王洪宇, 王文举. 大直径探针台的晶圆自动传输系统 [J]. 电子工业专用设备, 2011, 202: 36-40.

[6] 徐如, 秦会斌, 郑梁. 基于探针台的测量系统的研究与设计 [J]. 机电工程, 2011, 28 (12): 1536-1538.

[11] 陈伟, 李强. 基于 OPNET 的数字变电站通信网络实时性仿真分析 [J]. 电力科学与工程, 2011, 27 (10): 31-36.

[12] 丁修玲, 张延旭, 蔡泽祥, 等. 基于报文解析的变电站过程层网络信息流异常保护方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (13): 58-63.

[13] 王新生, 王伟杰, 陈敬男, 等. 一种对等网文件共享系统下的全局信任模型 [J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31 (11): 2201-2206.

[14] 吴润泽, 张保健, 唐良瑞. 双网耦合模型中基于级联失效的节点重要度评估 [J]. 电网技术, 2015, 39 (4): 1053-1058.

[15] 丁修玲. 基于信息流的智能变电站继电保护可靠性通信网络可靠性研究分析模型与评估研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

[16] 赵娟, 郭平, 邓宏钟, 等. 基于信息流动力学的通信网络性能可靠性建模与分析 [J]. 通信学报, 2011, (8): 159-164.