

# 计及通信时延的配电系统可靠性建模与评估

李朝闻

(长春工业大学电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要** 随着分布式可再生能源并网规模扩大, 配电网渗透率持续提升, 对主动控制策略的依赖日益增强, 进而推动信息通信系统需求增长。现有研究普遍采用解析法等传统方法, 存在运算效率较低的问题, 难以满足大规模配电网可靠性评估的实际需求。基于此, 本文开展计及通信时延的配电系统可靠性建模与评估研究。首先, 构建信息-物理融合配电网结构模型, 分别建立 SDH 协议下骨干通信层与 TCP/IP 协议下终端接入层的传输延时模型; 其次, 结合信息系统离散性与物理系统时序性, 构建耦合的可靠性综合评估模型; 最后, 提出序贯与非序贯蒙特卡罗模拟结合的混合求解方法, 模拟故障处理流程以量化通信时延影响。本研究有效验证了所提模型与混合求解方法的准确性, 以期提升配电网可靠性提供理论参考。

**关键词** 配电系统; 通信时延; 可靠性评估; 蒙特卡罗模拟; SDH 协议

**中图分类号**: TM74; TP3

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.004

## 0 引言

在智能电网建设持续推进的背景下, 配电网中智能终端、先进通信技术及传感监测技术的广泛应用, 正推动其逐步演变为信息系统与物理系统深度耦合的二元复杂系统<sup>[1]</sup>。然而, 分布式可再生能源大规模并网, 显著增加了配电网运行的经济性与可靠性挑战。主动控制策略成为关键解决方案, 但其高度依赖信息通信系统, 一旦信息通信失效将严重影响配电网运行。因此, 开展通信时延的配电网可靠性评估<sup>[2]</sup>成为该领域的研究聚焦点。

## 1 信息物理系统可靠性研究现状

信息物理系统的可靠性研究可分为两个阶段<sup>[3]</sup>:

第一阶段围绕信息系统与物理系统的耦合关系展开。首先, 构建典型信息系统的结构框架, 初步探究两者的耦合关联, 并从直接作用和间接作用两种方式描述信息元件或网络故障对物理系统的影响; 其次, 聚焦不同应用场景, 重点通过分析直接作用明确信息元件故障、网络拓扑改变与物理设备的耦合关系<sup>[4]</sup>, 同时建立通信时延物理系统可靠性模型。随着研究推进, 信息系统模型逐渐演变为更复杂的网络形态, CPS 可靠性评估方法大多转向采用模拟法<sup>[5-6]</sup>。

第二阶段的研究核心: 一是对信息系统进行更精细化的建模, 二是深入分析其对配电网的深层影响, 其中信息传输延时给 CPS 可靠性带来的作用尤为关键<sup>[7-8]</sup>。

分布式电源的接入, 进一步凸了解析法的局限性, 其难以全面刻画系统中的实时交互与多因素耦合关系。因此, 有学者尝试用模拟法来评估配电自动化的故障处理流程通, 如倪伟等<sup>[9]</sup>采用马尔可夫过程蒙特卡罗法, 通过抽取元件“运行-停运”时间序列模拟故障演化过程, 结合最优负荷削减调度模型, 精准计算故障期间的负荷缺供量与停电时长, 实现对含多能源元件的配电网可靠性评估。李莉等<sup>[10]</sup>提出融合改进深度优先搜索与二进制粒子群优化的混合模拟方法, 先通过改进 DFS 算法精准定位故障后孤岛分布, 再以联络开关状态为优化变量, 构建涵盖功率损耗、负荷恢复率等指标的多目标函数, 通过 BPSO 算法搜索最优开关组合方案, 有效提升故障隔离与供电恢复的效率和可靠性。这类研究相比解析法更具优势, 不仅能自然纳入微电源参与故障恢复的动态过程, 还能突破解析法仅考虑信息元件随机故障的局限, 如刘文霞等<sup>[11]</sup>基于主动配电网故障的自愈过程, 通过建立信息路由中断以及混合通信网结构下的信息传输延时的信息系统可靠性模型, 分析了信息传输有效性对系统处理故障的影响, 体现了模拟法在刻画信息故障动态影响上的价值。

针对现有研究的不足并且加快解析法本身的运算速度, 本研究采用模拟法构建信息传输延时模型, 提升评估结果贴合度, 为系统可靠性提升提供精准依据。

**作者简介**: 李朝闻 (2004-), 男, 本科, 研究方向: 主动配电网可靠性评估。

## 2 信息失效对配电网可靠性影响机理分析

### 2.1 配电系统结构建模

信息—物理融合配电网由物理层与信息层构成二元耦合体系（见图 1）。信息层按功能层级划分为主干网与接入网：主干网采用同步数字体系（Synchronous Digital Hierarchy, SDH）传输协议，构建配电站与子站间的广域通信通道，保障调控指令与状态信息的可靠传输；接入网则基于传输控制协议/网际协议（Transmission Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP）的以太网架构，实现配电子站与智能电子设备（Intelligent Electronic Devices, IED）的局域互联。在运行机制上，信息层输出的控制指令集直接作用于物理层的设备运行状态；而物理层的实时运行工况数据，通过智能电子设备采集后，反向为信息层的数据输入提供基础数据源，形成“指令—状态”双向动态交互闭环，支撑配电网的智能调度、故障自愈等高级应用，保障配电网的安全稳定运行与智能管控效能。

### 2.2 配电系统通信时延建模

在配电系统信息交互架构中，通信网络作为终端设备与主站系统的数据传输载体，其通信时延特性直接制约配电自动化功能的响应效能。本文基于电力通信网络分层架构，构建通信时延模型。

#### 2.2.1 骨干通信层传输时延建模（SDH 协议）

骨干通信层作为配电系统数据传输的核心承载层，

采用同步数字体系（SDH）协议保障高可靠性与低延时传输。其传输时延  $T_1$  聚焦于节点转发流程，涵盖交换延时、帧发送延时、线路传输延时三个核心环节，交换延时（ $T_{SF,i}$ ）：SDH 交叉连接设备对 SDH 帧开销进行解析、执行时隙交换操作的时间开销，保障数据平面的快速交换转发，帧发送延时（ $T_{TL,i}$ ）：与 SDH 帧结构参数及传输端口速率强相关，线路传输延时（ $T_{WL,i}$ ）：由物理传输距离与光纤介质中光信号传播特性决定。

对于包含  $M_1$  个节点的骨干网通信路径，其传输时延为各节点交换延时、帧发送延时、线路传输延时的线性累加和，数学表达式为：

$$T_1 = \sum_{i=1}^{M_1} (T_{SF,i} + T_{TL,i} + T_{WL,i}) \quad (1)$$

#### 2.2.2 终端接入层传输时延建模（TCP/IP 协议）

终端接入层作为配电终端与骨干通信层的接入层，需适配多样化终端设备，采用 TCP/IP 协议栈实现灵活接入。受系统负载率、路由跳数及协议机制影响，接入网引入复杂的传输时延。其传输时延  $T_2$  需叠加帧排队延时（ $T_{QL,i}$ ），并受网络负载率显著影响，采用随机扰动与归一化处理：引入随机扰动因子  $\delta$ ，反映网络动态波动特性，对于包含  $M_2$  个节点的接入网通信路径，需叠加各节点的交换延时（ $T_{SF,i}$ ）、帧发送延时（ $T_{TL,i}$ ）、帧排队延时（ $T_{QL,i}$ ）及线路传输延时（ $T_{WL,i}$ ），并通过归一化处理消除随机扰动的非线性影响，数学表达式为：

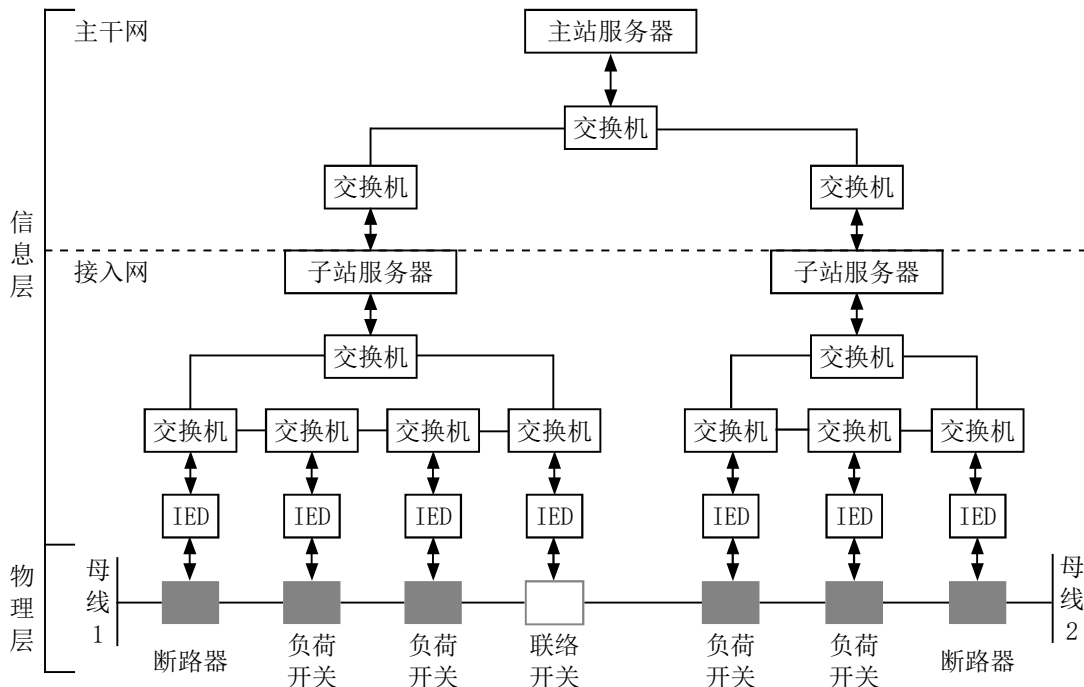


图 1 配电信息物理系统结构

$$T_2 = \frac{\sum_{i=1}^{M_2} (T_{SF,i} + T_{TL,i} + T_{QL,i} + T_{WL,i})}{\sqrt{1-\delta}} \quad (2)$$

### 2.2.3 系统端到端传输延时状态定义

综合骨干网传输延时  $T_1$  与接入网传输延时  $T_2$ ，定义系统端到端通信路径的传输延时状态  $R_2$ ：

$$R_2 = \begin{cases} 1, T_1 + T_2 < T_0 \\ 0, T_1 + T_2 > T_0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中， $T_0$ 为配电系统允许的最大传输延时阈值。 $R_2=1$ 表示传输延时处于允许范围内，可保障配电业务的正常交互； $R_2=0$ 则表示传输延时超限，可能引发动态传输失效。

## 3 基于蒙特卡罗模拟的通信时延对配电网故障后果的影响分析

配电网故障处理包含定位、隔离、恢复环节，通信时延通过影响信息系统的信息量测、开关遥控功能，干扰故障处理流程。利用蒙特卡罗模拟，随机生成通信时延、故障场景、信息交互状态，模拟故障处理全流程，量化通信时延对故障后果的影响。

### 3.1 模拟参数与场景构建

#### 3.1.1 故障场景参数

信息量测信号：设上传成功概率  $p_{meas}=0.9$ ，0-1 随机数模拟“成功1/失败0”。

开关遥控动作：设反馈成功概率  $p_{switch}=0.95$ ，0-1 随机数模拟“成功1/失败0”。

#### 3.1.2 模拟次数与初始化

设定模拟次数  $N=10\ 000$ ，每次模拟随机生成：故障区段、通信时延  $T$  及状态  $R_2$ 、量测信号与开关动作状态。

### 3.2 故障处理流程模拟

#### 3.2.1 故障定位模拟逻辑

$R_2=1$ （时延正常）：若信息量测信号构成完整路径，按最后一个经历故障电流的开关逻辑定位；否则用遗传算法判断定位结果。

$R_2=0$ （时延超限）：信号完整性受破坏，按信号不完整/无信号逻辑，模拟定位失败或错误重构路径情况。

$$\text{统计定位成功率 } P_{loc} = \frac{\text{定位成功次数}}{N} \quad (4)$$

#### 3.2.2 故障隔离模拟逻辑

1. 定位成功：(1) 开关动作成功：正确隔离，记录时间/范围。(2) 开关动作失败：搜寻可控开关，存在则尝试隔离；无则断路器跳闸。

2. 定位错误：(1) 开关动作成功：恢复引发跳闸，二次定位隔离。(2) 开关动作失败：分隔范围是否含故障点，模拟范围扩大。

$$\text{统计隔离成功率 } P_{iso} = \frac{\text{隔离成功次数}}{N} \quad (5)$$

$$\text{范围扩大概率 } P_{exp} = \frac{\text{范围扩大次数}}{\text{隔离失败次数}} \quad (6)$$

### 3.2.3 供电恢复模拟逻辑

通信正常 ( $R_2=1$ )：故障区域停电时间  $t=t_3$ ， $t_3$  为修复时间。

通信失效 ( $R_2=0$ )：故障区域停电时间  $t=t_1+t_2+t_3$ ， $t_1$  人工查找、 $t_2$  人工操作时间。

$$\text{统计平均停电时间 } \bar{t} = \frac{\sum \text{每次模拟停电时间}}{N} \quad (7)$$

$$\text{断路器平均跳闸次数 } \bar{k} = \frac{\sum \text{每次模拟跳闸次数}}{N} \quad (8)$$

## 4 算例分析

### 4.1 系统可靠性评估

基于蒙特卡罗模拟，对计及通信时延的配电系统可靠性进行了全面分析。结果如表1所示。

表1 系统可靠性计算结果

| 可靠性指标            | 数值               |
|------------------|------------------|
| SAIDI (系统平均停电时间) | 5.5 235 h/(用户·年) |
| EENS (期望缺供电量)    | 2.7 617 MW·h/年   |
| 断路器平均跳闸次数        | 0.1 526 次/年      |
| 故障定位成功率          | 89.02%           |
| 故障隔离成功率          | 84.74%           |
| 停电范围扩大概率         | 15.26%           |
| 平均通信时延           | 8.4 071 ms       |
| 时延标准差            | 9.4 256 ms       |

从核心可靠性指标看，系统平均停电时间 (SAIDI) 达 5.5 235 h/(用户·年)，期望缺供电量 (EENS) 为 2.7 617 MW·h/年，表明系统供电连续性存在优化空间。通信子系统表现出较高稳定性：平均通信时延 8.4 071 ms，时延正常比例 99.36%，但故障定位成功率 89.02%、隔离成功率 84.74% 及停电范围扩大概率 15.26%，揭示了通信时延的偶发波动对故障处理流程的干扰效应，需从信息—物理融合视角剖析其作用机制。

### 4.2 关键影响因素的敏感性分析

#### 4.2.1 网络负载率 ( $\rho$ ) 的双重影响

从折线图中不同负载率的曲线对比可见：负载率越高，SAIDI (用户平均停电持续时间) 数值越大；负载率越低，SAIDI 数值越小，说明高负载率会显著增加配电网通信时延，导致系统可靠性下降。

#### 4.2.2 骨干网节点数 ( $M1$ ) 的边际效应

从折线图中每条曲线的趋势可见：随着骨干网节

点数的增加,各负载率下的 SAIDI 均呈上升趋势。无论负载率高低,节点数越多,SAIDI 数值越高,说明骨干网节点数增加会加剧配电网通信时延,削弱系统可靠性。

#### 4.2.3 两者的综合影响

从折线图的曲线分布来看:当骨干网节点数少且负载率低时,SAIDI 处于较低水平(为较优状态);当节点数多且负载率高时,SAIDI 达到较高水平(为较差状态)。这表明网络负载率和骨干网节点数对通信时延的影响呈叠加效应——负载率越高、骨干网节点数越多,配电网通信时延越大,两者的联合作用会进一步强化对系统可靠性的负面影响。

不同网络负载率下的 SAIDI 变化详见图 2。

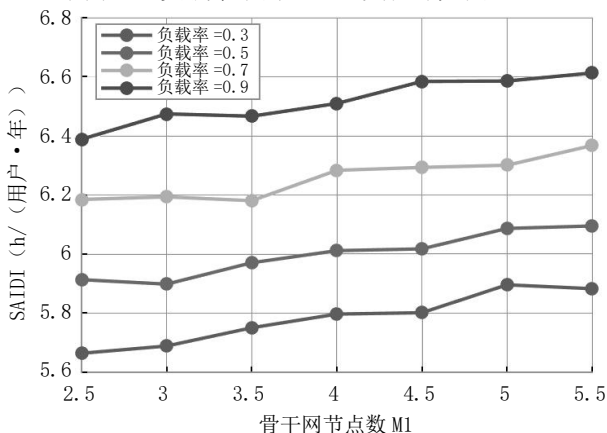


图 2 不同网络负载率下的 SAIDI 变化

## 5 结论

本文基于配电网的架构,在考虑骨干网 SDH 协议与接入网 TCP/IP 协议差异化传输特性、网络负载率及骨干网节点数量等影响因素的情况下,构建计及通信时延的配电系统可靠性评估模型,结合蒙特卡罗模拟对故障处理全流程进行仿真分析,由算例结果得出以下结论:

1. 当配电网物理层发生故障时,通信时延引发的信息传输失效会显著加剧物理故障的影响后果。具体表现为系统平均停电时间(SAIDI)较通信正常场景增长约 43.5%,期望缺供电量(EENS)增长约 41.7%,大幅增加了系统的故障损失与运维恢复成本,充分体现了通信时延在信息-物理耦合场景下对配电网可靠性的关键制约作用。

2. 不同通信关联因素对配电网可靠性的影响存在明显差异,需采取针对性优化措施。一方面,网络负载率与系统可靠性呈强负相关,当接入网负载率超过 80% 阈值后,帧排队延时会呈指数级激增,导致通信时

延超限概率大幅上升,因此需将接入网负载率严格控制在 80% 以内;另一方面,骨干网节点数量的增加会直接导致各节点传输延时累加值上升,时延超限风险随节点数增多而逐步加大,故在通信拓扑设计中应优先减少骨干网传输节点数量,以优化整体链路延时特性。

3. 后续研究将进一步探索更复杂信息扰动下的配电网可靠性影响机理,重点聚焦多协议混合传输场景下的时延协同波动、极端天气引发的信息-物理双重故障等复杂扰动因素,深入分析此类因素对通信时延稳定性、信息交互完整性的耦合影响机制,为配电网在高扰动场景下的可靠性提升提供更全面的理论支撑与优化方向。

## 参考文献:

- [1] 张瑶,王傲寒,张宏.中国智能电网发展综述[J].电力系统保护与控制,2021(05):180-187.
- [2] 邓华.配电网信息物理系统可靠性评估[D].南昌:南昌大学,2022.
- [3] 刘文霞,林子鉴,马铁,等.计及信息失效影响的主动配电系统可靠性建模与评估[J].电力系统自动化,2019,43(19):94-102.
- [4] 王超超,董晓明,孙华,等.考虑多层耦合特性的电力信息物理系统建模方法[J].电力系统自动化,2021,45(03):83-91.
- [5] 王进,钟啸,冯隆基,等.基于蒙特卡洛法的用电信息采集系统可靠性评估模型[J].电力工程技术,2020,39(03):173-179.
- [6] 薛禹胜,李满礼,罗剑波,等.基于关联特性矩阵的电网信息物理系统耦合建模方法[J].电力系统自动化,2018,42(02):11-19.
- [7] Phan K T, Phat H, Diep N N, 等.节能双跳物联网具有延迟中断约束的通信网络[J].IEEE 工业信息学汇刊,2021,17(07):4892-4903.
- [8] Hossein H N Y, Yousef K, Alimorad M. IEEE 802.15.4 的马尔可夫链模型在周期性流量下具有数据包违约的时间关键型无线传感器网络[J].环境智能与人性化计算杂志,2022,13(04):2253-2268.
- [9] 倪伟,吕林,向月,等.基于马尔可夫过程蒙特卡洛法的综合能源系统可靠性评估[J].电网技术,2020,44(01):150-158.
- [10] 李莉,阳东升,余梦天,等.基于改进混合法的电网运行可靠性评估方法研究[J].电测与仪表,2021,58(10):74-79.
- [11] 刘文霞,宫琦,郭经,等.基于混合通信网的主动配电网信息物理系统可靠性评价[J].中国电机工程学报,2018,38(06):1706-1718.