

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.008

SASDN 时滞不确定性分析的顶层设计

葛磊蛟¹, 马滕肖², 陈文广³, 白星振², 张帅²

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;

2. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590;

3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:智能配电网态势感知(SASDN)是配电网稳定运行和精准调度的基础,具有广阔的应用前景。然而,SASDN面临通信延时、科学计算耗时、不同子站系统响应时长不一等引起的一系列时滞不确定性问题,无法满足智能配电网精准调度的要求,限制了其应用范围。为此,从技术层面对SASDN的时滞不确定问题进行了分析和阐述。首先,阐述了配电网态势感知以及时滞电力系统的不确定性研究方法;其次,分析了SASDN时滞不确定性产生的机理和影响;最后,构建了SASDN时滞不确定性研究的总体架构,以期为后续研究工作提供借鉴。

关键词:智能配电网;态势感知;时滞不确定性;机理分析;鲁棒性分析;灵敏性分析

中图分类号:TM734

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)03-0051-07

0 引言

智能配电网是电力能源“产-供-销”顺利运转的关键,也是国家推动新能源消纳、节能减排、能源高效利用的主阵地。近年来,随着微电网、分布式电源、电动汽车(electric vehicle, EV)、冷热电三联供等迅猛发展并大规模接入,云计算、大数据、物联网和移动互联网等新技术的应用,智能配电网越来越复杂,运行态势更加多样。于是,通过对智能配电网运行状态关键量的觉察、理解及对未来状态的预测,实现对智能配电网的“索其情-知其态-循其势”,即智能配电网态势感知(situational awareness of smart distribution network, SASDN),成为了智能配电网稳定运行和精准调度的关键。因此,如何提升SASDN的能力和水平,实现对智能配电网历史、现在及未来运行状态的全面精准分析监控及预测,以减少智能配电网不确定性,从而确保整个电力能源供应产-供-销的运转,具有重要的意义。

文中从技术层面分析SASDN时滞不确定问题,介绍目前配电网态势感知以及时滞电力系统的不确定性研究方法,分析SASDN时滞不确定性产生的机理和影响,进一步从模型构建、鲁棒性分析、灵敏度分析等方面构建SASDN时滞不确定性研究的总体架构,为后续研究工作提供借鉴。

1 SASDN 研究现状

美、欧、日、韩等国外学者都对SASDN进行了一

些探索研究,美国在该领域取得了较多研究成果,主要聚焦于SASDN的系统架构^[1]、数据采集方法^[2]、稳定控制^[3-5]、通信安全^[6]等方面,文献[2]提到通过对配电网生产管理系统(power production management system, PMS)的智能维护,提升数据采集的精度,实现SASDN能力提升,但未考虑PMS的数据采集、通信、系统数据处理等时滞问题。文献[5]提出通过多次数据对比分析和增强稳定判据的要求,达成态势感知的数据分析,完成系统稳定性优化控制,但未明确指出系统稳定的上下界。文献[6]提出通过信号处理方法,可提高数据通信安全和精准度,进而提升态势感知的水平,但未涉及态势感知模型的适用性。欧洲学者们^[7-8]对于SASDN的时滞现象主要聚焦于数据采集的通信延时所引起时滞问题,一般以假定时滞为确定数,分析系统的稳定裕度。我国学者主要对SASDN基本概念探索^[9]、体系架构^[10-11]、可视化^[12]、系统安全稳定^[13-14]等相关关键技术进行讨论。文献[9]对SASDN和态势利导的关键技术进行了整体评述,文献[13]提出了一种面向能源互联网的交直流混合城市配电网互联结构,并分析其对3种不同网络攻击的安全态势。同时,我国的一些学者聚焦于SASDN的应用,从通信安全^[15]、状态估计^[16-18]、自愈控制^[19]、系统运行控制^[20-22]、参数灵敏度分析^[23-26]等方面进行研究,较少考虑SASDN时滞不确定性,但是随着智能配电网毫秒级精准调度方法的应用,SASDN时滞不确定性必将成为不可忽视的重要因素。文献[16]全面阐述了多种可控负荷及高级量测的规模化接入所引起的主动配电网数据

收稿日期:2019-11-04;修回日期:2019-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807134)

精度不够、计算效率等面临的挑战,以及状态估计 3 个方面的关键技术。

2 时滞电力系统不确定性研究方法

在时滞电力系统方面,主要针对大电力系统(输电网),美国的康奈尔大学,日本的早稻田大学,国内的华中科技大学、天津大学、武汉大学、华北电力大学等高校对时滞电力系统进行过一些研究,其主要聚焦于时滞定常数或者单一参数时滞电力系统模型研究,学者们针对定常数的时滞电力系统从时滞电力系统的模型构建^[27-28]、快速的超越方程求解^[28]、系统分岔^[29]等方面取得一些的成果。文献[28]提出了一种确定数的单时滞电力系统稳定性的解析方法,能快速获取系统稳定判据。文献[29]提出了一种基于预测-校正思路的时滞电力系统全特征谱追踪算法,从零时滞开始,逐步增加系统时滞,并利用已有结果进行预测,然后通过求解一个优化模型对预测结果加以校正,以实现时滞系统全部特征值的求解。

综上所述,在 SASDN 以及时滞电力系统的理论研究方面,国内外学者进行了一些研究,并取得了一定的进展,但是依旧在如下 2 个方面有待深入研究:

(1) 现有关于 SASDN 的研究主要聚焦于应用,缺少 SASDN 时滞不确定性的定量分析方法;

(2) 现有的时滞电力系统理论研究主要针对大电网,已经拥有一些成果,但是在 SASDN 时滞定量分析方法方面,国内外学者涉及不多。

针对电力系统中不确定性问题的处理,主要分析方法有概率分析法、模糊数学法和区间分析方法等。在实际工程中,概率分析法和模糊数学法所需要确定性参数获取往往比较困难,对重要参数的确定主要基于人为设定,分析结果往往与实际情况相差较大。区间分析方法作为一种重要的考虑不确定性的分析方法,主要用于处理外延确定、内涵不确定的信息。区间分析方法所需参数主要为不定量的上下界,一般能够较为简单地获取且精度较高,因此其工程实用价值也更高,但区间方法的道德结果往往过于保守。

区间-仿射数学方法是一种研究参数不确定性问题的常用数学方法,能够利用不确定变量之间的相互关系,解决传统区间方法的保守性问题,已广泛应用于电力系统、机械、能源等行业。智能配电网作为典型的多变量、高维、复杂、非线性的系统,不可避免地存在着不确定性和风险,其不确定性主

要包括预测不确定性、参数不确定性、运行状态不确定性、量测不确定性及价费不确定性等。尤其, SASDN 时滞参数不确定性,其时滞参数的上下确界才是调度运行人员关注的焦点,这正好与区间仿射数学方法的特征高度吻合。

同时,在智能配电网及其相关领域应用区间仿射方法方面,国内外学者进行了一些研究,主要包括潮流计算^[17-18]、稳定性分析^[16, 25]、暂态分析^[29, 31]等方面,文献[17]考虑风电规模化接入电网,提出了以仿射和区间运算为基础的不确定性潮流计算方法,获得了不确定性潮流解的上下界,以克服区间运算过于保守的缺点。文献[18]针对现有潮流区间算法结果保守的问题,利用区间仿射算术来考虑区间变量之间的相关性进行快速分解法潮流计算,并在每步迭代中引入线性优化,抑制区间增长。文献[32]针对配电网三相不对称潮流计算不确定性,采用仿射方法提高计算精度。文献[33]提出了一种数据不确定性条件下配电网的仿射潮流算法,对区间算法的保守性进行了改善。

3 SASDN 时滞产生的机理和影响

3.1 SASDN 时滞产生的机理

在已知的国内典型实际工程中, SASDN 正面临着多种时滞不确定性问题,主要有以下 3 个方面。

3.1.1 大电网中通信延时不确定性

在智能配电网对大电网的有效支撑应用方面, SASDN 过程中通信延时的不确定性被认为是影响精准调度和系统稳定运行的关键。通信延时主要在数据传送、数据分类、数据计算和控制执行个过程中产生。假设相量量测单元(phasor measurement unit, PMU)是使用共用广域通信网络与控制中心进行通信。

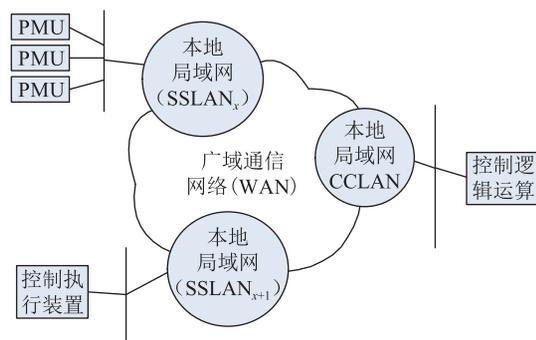


图 1 通信网络的简化结构

Fig.1 Simplified structure of communication network

假设 PMU 和控制执行装置安装在变电站中,并与本地局域网(local area network, LAN) 连接;控制

中心安装在远方,与另一个 LAN 连接。PMU 中的测量数据首先送入同步相量数据集中器 (phasor data concentrator, PDC) 处理, PDC 再将处理后的数据组送入控制应用逻辑。经过运算,控制指令最后再从控制中心通过广域通信网络 (wide area network, WAN) 发送到控制执行装置处动作。

(1) 数据传送时间。在通常情况下, LAN 的网速要远高于 WAN。因此,可以合理地认为数据传送时间约等于 WAN 中数据传送时间。

(2) PDC 的数据处理时间。PDC 对数据的处理时间主要取决于数据分类算法。PDC 数据处理时间由所有输入数据在通信网络中的最长传送时间决定。

(3) 控制信号生成与执行时间。在此阶段,已处理的数据组被送入控制逻辑进行运算,然后再生成控制信号并送出给远方的控制执行装置动作。控制执行时间则指执行装置从收到控制信号起到完成要求动作所用的时间。以往研究证实,控制逻辑的运算时间和控制执行时间在控制延时中占据了很大比例。

3.1.2 电网科学计算耗时不确定性

在可再生能源消纳应用方面, SASDN 过程中数据处理、状态估计和潮流计算等科学计算耗时的不确定性,是影响系统稳定运行的关键。随着大量分布式电源在配电网中的接入,配电网结构日趋复杂,使得潮流计算等计算过程更加冗长,导致 SASDN 过程产生时滞现象。以潮流计算为例,在 Matlab 软件中配电网节点个数不同时的潮流计算时间如表 1 所示。

表 1 配电网节点个数不同时的潮流计算时间

Table 1 Calculation time of power flow with different number of nodes in distribution network

节点个数	潮流计算时间/ms
4	0.290 7
10	0.321 1
14	4.158 0
33	8.135 0

从表 1 可以看出,随着节点个数的增加,计算时间也逐渐变长。因此,随着配电网结构日趋复杂,节点日益增多,潮流计算等计算时间也会增加,导致 SASDN 过程产生时滞现象。

3.1.3 自动需求响应控制响应时间不确定性

在区域电网的削峰填谷应用方面,采用自动需求响应 (automated demand response, ADR) 技术。其中, SASDN 过程中由于子站系统内程序不同,配件类型不同等原因使得不同用户需求响应子站系统

响应时长不一,这种不确定性是影响该工程精准调度的关键。

ADR 系统的逻辑架构分为 3 层:感知层、网络层和应用层,如图 2 所示。感知层对数据源传感测量、采集、接入及处理。支撑 ADR 的通信方式可以采用多种形式,对于某些短距离、微功率的数据采集终端,还会增加相应的数据中继点,以延伸感知层的覆盖距离,为系统服务提供基础数据。网络层是用户与电网之间沟通的桥梁,主要采用电力专网和公用通信网种方式。应用层以软件服务为实现形式,向电力用户提供多种需求响应 (demand response, DR) 功能服务,如直接负荷控制 (direct load control, DLC)、自动抄表、ADR、电力能效评估、EV 充换电等。

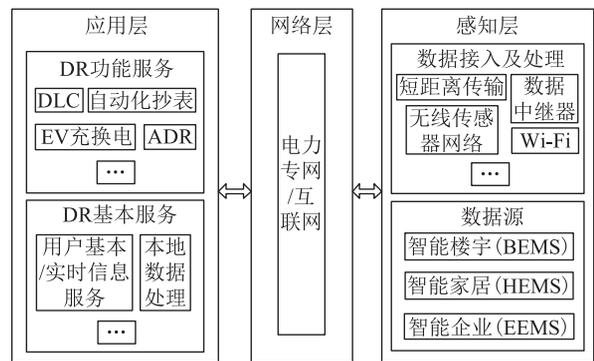


图 2 自动需求响应系统逻辑架构

Fig.2 Logical structure of ADR system

在此过程中,感知层中通信方式的选择不同,数据采集终端的位置不同,网络层中网络可能受到运行商限制,应用层中各软件的运行时间不同等原因导致不同用户需求响应时间的不确定性。

3.2 SASDN 时滞产生的影响

以上这些以及其他原因导致的时滞不确定性问题,严重影响了智能配电网的稳定性灵活性,严重制约了 SASDN 的发展推广。

(1) 在稳定性方面,一旦时滞参数设置不当,可能会造成智能配电网安全稳定运行的局部电压、无功越限,或者导致局部用户的停电风险,甚至波及大电网的稳定。

(2) 在智能配电网的灵活性方面,配电网灵活性反映了配电网充分统筹和利用系统内可调度资源,有效应对运行中的多重不确定性因素扰动,灵活适应各种复杂运行环境并维持高水平运行目标实现的能力。对于灵活性,当系统中态势感知时滞过长,会对系统中能量的调度产生影响,系统反应时间进而降低系统灵活性。

如何定量分析 SASDN 的时滞不确定性,已成为

国内外所关注的焦点,也是智能配电网亟需深入研究的问题。另外,由于应用场景变化也对 SASDN 的时滞形成影响,进一步加剧了 SASDN 的时滞不确定性。因此,研究 SASDN 时滞不确定性的定量分析方法,对智能配电网的稳定运行、精准调度及提升 SASDN 能力意义重大。

4 SASDN 时滞不确定性分析关键技术构架

针对时滞影响下的 SASDN 所面临的不确定性参数及其表征方法的选择,多时滞参数相互重叠影响下时滞参数上下确界的求取,参数交叉作用导致模型适应性的改善等挑战,拟从模型构建、鲁棒性分析、灵敏度分析等多方面深入开展 SASDN 时滞不确定性的区间仿射方法研究,归纳提出了 SASDN 时滞不确定性分析的关键技术架构,如图 3 所示。

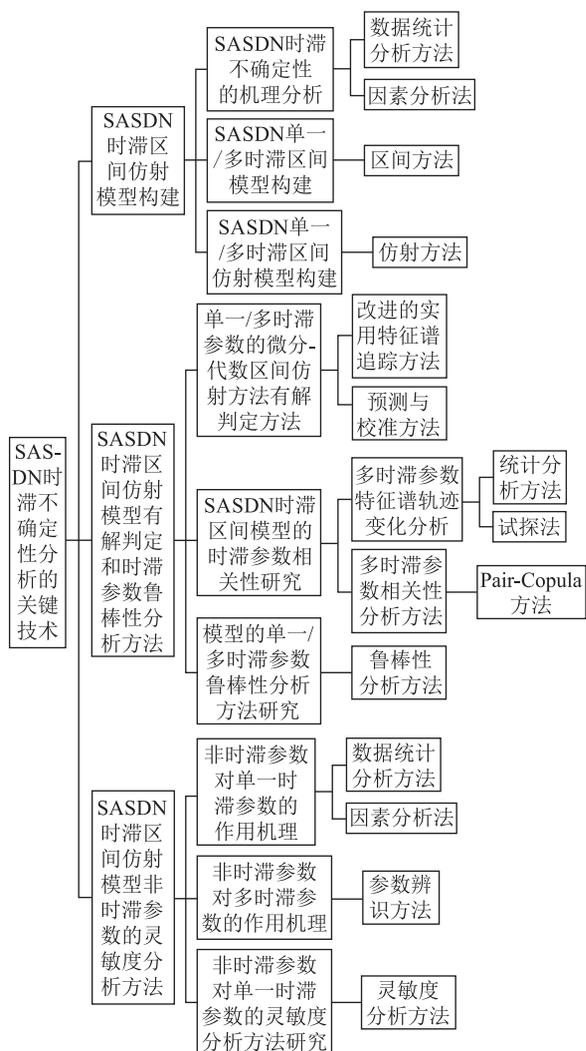


图 3 SASDN 时滞不确定性分析的关键技术架构

Fig.3 Key technology architecture of delay uncertainty analysis for SASDN

4.1 SASDN 时滞区间仿射模型构建方法

在配电网调度运行过程中,如何选用合适的时

滞参数表征方法,构建合理的 SASDN 时滞不确定性模型是认识 SASDN 时滞作用机理和进行 SASDN 时滞不确定性定量分析的关键。

首先,梳理 SASDN 所涉及的关键参数,分析 SASDN 产生时滞的主要原因。依据智能配电网调度的核心指标,将 SASDN 的参数定性划分为非时滞参数和时滞参数 2 种类型。结合现场实际运行情况,分析 SASDN 时滞不确定性的作用机理。基于统计分析方法和因素分析法等,探索 SASDN 主要时滞参数的影响大小和重要性。

其次,借鉴已知服务于大电网调度的时滞确定数电力系统动态模型微分-代数方程,充分考虑智能配电网分级、分层、分区架构,结合配电网三相不对称、组成复杂多样等特点,改进已有的时滞电力系统确定数微分-代数方程模型构建方法,探索 SASDN 时滞问题微分-代数方程模型的构建方法。基于 SASDN 主要时滞参数的影响大小,采用区间方法,构建 SASDN 的单一时滞区间参数微分-代数方程模型。结合非时滞参数和时滞参数的分类,探索 SASDN 多时滞区间的微分-代数方程模型构建方法。

最后,借鉴可降低区间保守性的仿射方法,深入分析区间方法特有的保守性,考虑区间解扩散问题,探索区间仿射方法对区间数保守性的改进方法,即对噪声元的选择定量分析方法。

4.2 SASDN 时滞区间仿射模型有解判定和时滞参数鲁棒性分析方法

在智能配电网调度过程中,如何获得 SASDN 时滞不确定性的定量分析模型具有可行解的判定,探索 SASDN 时滞不确定性定量分析模型的时滞参数鲁棒性具有重要意义。

首先,分析时滞电力系统超越动态方程模型的 Lypunov 直接法的实用特征谱轨迹跟踪方法,结合区间仿射算法和 SASDN 区间仿射模型的特点,对实用特征谱追踪方法进行改进,探索对 SASDN 单一/多时滞参数区间仿射模型是否有解判定方法。

其次,考虑 SASDN 的多时滞参数之间相互影响,依据时滞参数的影响大小,按照 SASDN 多时滞区间仿射模型的有解判定方法,定量分析时滞参数变化与改进的实用特征谱轨迹发生偏差的关系。基于统计分析方法探索 SASDN 时滞区间仿射模型多时滞与改进实用特征谱轨迹发生偏差的规律。并采用 Pair-copula 方法等参数相关性分析方法,对 SASDN 时滞区间仿射模型的多时滞参数相关性进行分析。

最后,以改进的 Lyapunov 判据为标准,分析 SASDN 时滞区间仿射模型单一时滞参数鲁棒性,应用 H_∞ 鲁棒分析理论,采用试探法、枚举法、预测校准法等逐步趋优,获得单一时滞参数的区间解。而对于 SASDN 时滞区间仿射模型的多时滞参数,基于 Pair-Copula 方法等参数相关性分析方法结论,获得多时滞参数的解耦方法。

构建模型有解判定方法和参数鲁棒性分析方法,实现对所提模型时滞参数区间解的求取,可获得智能配电网安全稳定运行的时滞区间,为智能配电网调度人员的运行管理提供数据支持,为智能配电网精准调度提供有力的理论基础和依据。

4.3 SASDN 时滞区间仿射模型非时滞参数对时滞参数的灵敏度分析方法

SASDN 时滞不确定性模型所得结论的准确性是 SASDN 推广应用的关键。非时滞参数随着配电网运行场景不同,对 SASDN 的时滞参数会产生正或负的影响,进而影响到所提模型的适应性,甚至导致所提模型求解结果与实际的配电网调度运行需求不符。因此,如何定量分析所提模型中非时滞参数对时滞参数的影响,探索 SASDN 非时滞参数对时滞参数的灵敏度,有助于进一步提升 SASDN 的能力和水平,为复杂场景的智能配电网精准调度提供有力的理论依据,为实现不确定性条件下电力能源供应的调度管理打下扎实的基础。

首先,结合现有的配电网调度实际运行数据和典型应用场景,应用统计分析方法,筛选出可能影响时滞参数的运行环境、温度、湿度等所有非时滞参数,采用主成分分析方法,获取系统灵敏度分析所关注的主要非时滞参数。考虑主要非时滞参数的特性,选取影响较大的单一时滞参数作为考察对象,分析 SASDN 时滞区间仿射模型非时滞参数对单一时滞参数的主要影响因素。然后基于多时滞的相关性分析成果,探索 SASDN 时滞区间仿射模型非时滞参数对多时滞参数的关键影响因素辨识方法。

其次,基于 Pair-Copula 方法等参数相关性分析方法,对 SASDN 区间仿射模型关注的非时滞参数进行相关性分析,实现所关注的非时滞参数解耦。在 SASDN 时滞区间仿射模型的非时滞参数对时滞参数的关键影响因素分析成果的基础上,改进 SASDN 区间仿射模型,并基于改进的特征谱追踪方法,应用试探法,逐步探索所提区间仿射模型非时滞参数对单一时滞参数的灵敏度分析方法。

最后,基于 SASDN 时滞区间仿射模型的非时滞参数对时滞参数的关键影响因素分析成果,考虑非

时滞参数与时滞参数相关性,应用改进的特征谱追踪方法,选取逐步试探策略,探索所提区间仿射模型的非时滞参数对多时滞参数的灵敏度分析方法。

5 结语

SASDN 时滞不确定性问题,严重影响了智能配电网的灵活性和互动性,制约了 SASDN 的发展推广。如何定量分析 SASDN 的时滞不确定性,已成为国内外电力企业、科研院所关注的焦点,也是智能配电网亟需深入研究的问题。

文中在已有的关于 SASDN、不确定性仿真分析方法等研究成果基础上,基于 SASDN 时滞参数不确定性特点,应用新技术和理论方法,深入研究 SASDN 时滞不确定性的区间仿射方法,为智能配电网稳定运行与精准调度提供理论依据,为电力能源供应的精准调度管理奠定基础。

参考文献:

- [1] PANTELI M, CROSSLEY P, KIRSCHEN D S, et al. Assessing the impact of insufficient situation awareness on power system operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2967-2977.
- [2] GHOSH S, GHOSH D, MOHANTA D K. Situational awareness enhancement of smart grids using intelligent maintenance scheduling of phasor measurement sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7685-7693.
- [3] PHAM T N, NAHAVANDI S, TRINH H, et al. Decentralized bounded input bounded output stabilization of perturbed interconnected time-delay power systems with energy storages[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2017, 93: 51-64.
- [4] SHAO Hanyong, LI Huanhuan, ZHU Chuanjie. New stability results for delayed neural networks[J]. Applied Mathematics and Computation, 2017, 31: 324-334.
- [5] LIN Wenjuan, HE Yong, ZHANG Chuanke, et al. Stability analysis of neural networks with time-varying delay: enhanced stability criteria and conservatism comparisons[J]. Communication in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2018, 54: 118-135.
- [6] EDGAR G K, CATHERWOOD D, BAKER S, et al. Quantitative analysis of situation awareness: modelling and measuring situation awareness using signal detection theory[J]. Ergonomics, 2018, 61(6): 762-777.
- [7] CHOI E J, CHO S, JO J H, et al. Performance analysis of sensor systems for space situational awareness[J]. Journal of Astronomy and Space Sciences, 2017, 34(4): 303-313.
- [8] BOTEGA L C, DE S, JÉSSICA O, et al. Methodology for data and information quality assessment in the context of emergency situational awareness[J]. Universal Access in the Information Society, 2016.
- [9] 王守相, 梁栋, 葛磊蛟. SASDN 和态势利导关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 2-8.

- WANG Shouxiang, LIANG Dong, GE Leijiao. Key technologies of situation awareness and orientation for smart distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 2-8.
- [10] 杨胜春, 汤必强, 姚建国, 等. 基于态势感知的电网自动智能调度架构及关键技术[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 33-39. YANG Shengchun, TANG Biqiang, YAO Jianguo, et al. The architecture and key technology of automatic intelligent power dispatching based on situational awareness[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 33-39.
- [11] 王晓辉, 陈乃仕, 李焯, 等. 基于态势联动的主动配电网多源优化调度框架[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 349-354. WANG Xiaohui, CHEN Naishi, LI Ye, et al. Architecture and key technologies for situational awareness based automatic intelligent dispatching of power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 349-354.
- [12] 章坚民, 陈昊, 陈建, 等. 智能电网态势图建模及态势感知可视化的概念设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 168-176. ZHANG Jianmin, CHEN Hao, CHEN Jian, et al. Smart grid situation awareness diagram modeling and conceptual design of situation awareness visualization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 168-176.
- [13] 徐成, 梁睿, 程真何, 等. 面向能源互联网的智能配电网安全态势感知[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 13-18. XU Cheng, LIANG Rui, CHEN Zhenhe, et al. Security situation awareness of smart distribution grid for future energy internet[J]. Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 13-18.
- [14] 黄伟, 刘琦, 杨舒文, 等. 基于主动配电系统供电能力的安全态势感知方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 74-80. HUANG Wei, LIU Qi, YANG Shuwen, et al. Security situation awareness based on power-supply ability model of active distribution system[J]. Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 74-80.
- [15] 陆一鸣, 刘东, 柳劲松, 等. 智能配电网信息集成需求及模型分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 1-4, 96. LU Yiming, LIU Dong, LIU Jinsong, et al. Information integration demand and model analysis for smart distribution grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 1-4, 96.
- [16] 吴在军, 徐俊俊, 余星火, 等. 主动配电网状态估计技术评述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 182-191. WU Zaijun, XU Junjun, YU Xinghuo, et al. Review on state estimation technique of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 182-191.
- [17] 丁涛, 崔翰韬, 顾伟, 等. 基于区间和仿射运算的不确定潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 51-55, 115. DING Tao, CUI Hantao, GU Wei, et al. An uncertainty power flow algorithm based on interval and affine arithmetic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 51-55, 115.
- [18] 胡健, 付立军, 马凡, 等. 基于仿射算术优化的不确定系统区间潮流快速分解法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 125-131. HU Jian, FU Lijun, MA Fan, et al. Fast decoupled power flow calculation of uncertainty system based on interval affine arithmetic optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 125-131.
- [19] 董旭柱, 黄邵远, 陈柔伊, 等. 智能配电网自愈控制技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 17-21. DONG Xuzhu, HUANG Shaoyuan, CHEN Rouyi, et al. Self-healing control technology of intelligent distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 17-21.
- [20] 王守相, 葛磊蛟, 王凯. 智能配电系统的内涵及其关键技术[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 1-6. WANG Shouxiang, GE Leijiao, WANG Kai. Main contents and key technologies of smart distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 1-6.
- [21] 王守相, 葛磊蛟. 主动配电系统运行与控制关键技术[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 85-90. WANG Shouxiang, GE Leijiao. Key technology of operation and control of active distribution system[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 85-90.
- [22] 杨宇荣, 许永军, 杜东威, 等. 基于网络分布式规约的配电网安全防护方案应用[J]. 浙江电力, 2019, 38(3): 48-53. YANG Yurong, XU Yongjun, DU Dongwei, et al. Application of distribution network security authentication scheme based on DNP 3.0[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(3): 48-53.
- [23] 于丹文, 杨明, 翟鹤峰, 等. 鲁棒优化在电力系统调度决策中的应用研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 134-143, 148. YU Danwen, YANG Ming, ZHAI Hefeng, et al. An overview of robust optimization used for power system dispatch and decision-making[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 134-143, 148.
- [24] 王宗杰, 郭志忠. 节点类型扩展潮流计算的灵敏度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 35-39. WANG Zongjie, GUO Zhizhong. Sensitivity factor analysis for bus type extended load flow[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 35-39.
- [25] NGUYEN P H, BLAAUWBROEK N, NGUYEN C, et al. Interfacing application for uncertainty reduction in smart energy systems utilizing distributed intelligence[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017(80): 1312-1320.
- [26] 贾宏杰. 电力系统时滞稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 2017. JIA Hongjie. Delay stability of power system[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [27] 余晓丹, 贾宏杰, 王成山. CTODE 和 CTDAE 模型及其在电力系统时滞稳定分析中的应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(5): 533-544. YU Xiaodan, JIA Hongjie, WANG Chengshan. CTODE and CTDAE models and their applications in time-delay stability analysis of power systems[J]. Science China: Technical Science, 2013, 43(5): 533-544.

- [28] 姜懿郎,贾宏杰,姜涛,等. 电力系统单时滞稳定裕度求解模型简化方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(2):46-52.
JIANG Yilang, JIA Hongjie, JIANG Tao, et al. A model simplification method for solving stability margin of power system with single time-delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2):46-52.
- [29] LIU Zhuangzhuang, WANG Tianshu, LI Junfeng. Non-intrusive hybrid interval method for uncertain nonlinear systems using derivative information[J]. Acta Mechanica Sinica, 2016, 32(1):170-180.
- [30] 余晓丹,董晓红,贾宏杰,等. 基于朗伯函数的时滞电力系统 ODB 与 OEB 判别方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(6):33-37,111.
YU Xiaodan, DONG Xiaohong, JIA Hongjie, et al. Discriminating method for OEB and ODB in time-delayed power systems based on Lambert W function [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6):33-37, 111.
- [31] SONG Haiyang, YU Kaiping, LI Xiangyang, et al. Affine arithmetic applied to transient statistical energy analysis of a two-oscillator system [J]. Mechanics Research Communications, 2015, 70:12-16.
- [32] WANG Yang, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Interval power flow analysis via multi-stage affine arithmetic for unbalanced distribution network [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 142:1-8.
- [33] VACCARO A, CANIZARES CA, VILLACCI D. An affine arithmetic-based methodology for reliable power flow analysis in the presence of data uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2):624-632.

作者简介:



葛磊蛟

葛磊蛟(1984),男,博士,讲师,研究方向为智能配用电、云计算和大数据(E-mail:leg-endglj99@tju.edu.cn);

马滕肖(1995),女,硕士在读,研究方向为智能配电网优化调度控制、态势感知;

陈文广(1990),男,硕士,工程师,从事电能计量现场校验相关工作。

A top-level design for time-delay uncertainty analysis of situational awareness in smart distribution network

GE Leijiao¹, MA Tengxiao², CHEN Wenguang³, BAI Xingzhen², ZHANG Shuai²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education(Tianjin University), Tianjin 300072, China; 2. School of Electrical and Automation Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Situation awareness of smart distribution network (SASDN) is the basis of stable operation and precise scheduling. Distribution network has a broad application prospect. However, SASDN is faced with a series of time-delay uncertainties caused by communication delay, scientific calculation time, and different sub-station system response time, which cannot meet the requirements of accurate scheduling of intelligent distribution network and limits its application scope. For this reason, the time-delay uncertainty of intelligent distribution network situation awareness is analyzed and expounded from the technical level. Firstly, the research status of this problem at home and abroad is introduced. Secondly, the mechanism and influence of time-delay uncertainty of situation awareness in intelligent distribution network are analyzed. Finally, the general framework of the study on the time-delay uncertainty of situation awareness in smart distribution network is constructed to provide reference for the future research.

Keywords: smart distribution network; situation awareness; delay uncertainty; mechanism analysis; robust analysis; sensitivity analysis

(编辑 钱悦)