

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221536

电力信息物理系统韧性的概念与提升策略研究进展

龚立, 王先培, 田猛, 李晓旭, 朱紫阳

(武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 信息系统和物理系统耦合形成的信息物理系统, 使电力系统具有更强的可控可观性, 与此同时, 信息系统与物理系统的故障将造成更严重的电力安全事故。如何结合通信因素分析信息系统与物理系统的互相作用, 是提升电力信息物理系统韧性的关键问题。首先, 设计了电力信息物理系统的框架, 定义了电力信息物理系统韧性概念的特点并分析韧性的意义。其次, 基于信息流动路径的传输原理介绍通信技术的特点和发展趋势, 并根据信息网络特点分析不同极端事件对韧性的影响。再次, 归纳了电力信息物理系统联合仿真方法。然后, 总结了各层次网络韧性提升策略的研究进展, 探讨了卫星通信、无人机通信等应急通信技术的可行性。最后, 阐述电力信息物理系统韧性研究未来面临的挑战。

关键词: 电力信息物理系统; 信息网络; 通信影响; 韧性提升

Concepts and research progress on enhancement strategies for cyber physical power system resilience

GONG Li, WANG Xianpei, TIAN Meng, LI Xiaoxu, ZHU Ziyang

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A cyber physical system coupling cyber and physical systems makes the power system more controllable and observable, while its failure will cause more serious power safety accidents. How to combine communication factors to analyze the interplay between the cyber and physical systems is a key issue in enhancing the resilience of the cyber physical power system. First, this paper designs the framework of the cyber physical power system, defines the characteristics of the cyber physical power system resilience and analyzes its significance. Second, based on the transmission principle of cyber flow path, this paper introduces the characteristics and development trend of communication technology, and analyzes the impact of different extreme events on resilience according to the characteristics of cyber network. Next, a joint simulation method of cyber physical power system is summarized. Then, the resilience enhancement strategies at each level of the cyber physical power system are summarized. The feasibility of emergency communication technologies such as satellite communication and unmanned aerial vehicle communication are explored. Finally, future challenges of the cyber physical power system resilience research are elaborated.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177109).

Key words: cyber physical power system; cyber network; cyber effect; resilience enhancement

0 引言

随着新兴技术的不断发展和应用, 大量的智能电子设备得到广泛的推广和部署, 电力系统的规模持续扩大, 电力系统不再是仅有多个自动化子系统构成的一个割裂的、局部的、孤立的电力网络, 而

是由物理系统和信息系统深度耦合形成的多维、复杂的电力信息物理系统^[1-3]。

物理系统依赖信息系统进行数据感知和信息传递, 数字化的物理参量需要依赖信息系统进行传递, 保证电力系统的实时感知及动态控制; 信息系统依赖物理系统的电力供给和具体的设备载体, 信息系统传递的各种控制指令依赖具体的设备实现状态的变化。通过建立的依赖关系, 物理系统与信息系统互相影响, 单个系统中发生的故障将耦合、扩散,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177109); 湖北省重点研发计划项目资助(2020BAB109)

严重威胁电力系统的安全^[4]。

2003 年美加大停电事故中, 起因是物理系统中输电线路因短路停止运转, 而信息系统并未及时检测导致物理故障的扩大, 造成 60 亿美元的经济损失^[5]。2015 年乌克兰停电事故中, 信息系统被恶意攻击, 开关作为具体的设备载体执行恶意倒闸操作, 发电机组所有负荷都被切除, 导致电力系统无法为 8 万用户提供正常的电力供给^[6]。2021 年美国得州大停电事故中, 物理系统中天然气供电机组、风电机组因寒冷天气发生故障, 造成发电机机组停运规模不断扩大, 负荷损失达 20 GW^[7]。

上述事故凸显电力信息物理系统面临极端事件时应对能力不强的弱点, 在这类极端事件的持续干扰下, 电力信息物理系统无法长期处于高度可靠、稳定的状态, 其应对措施逐渐引起人们的重视^[8]。在这一背景下, 韧性用于描述电力系统面临极端事件时具备预防、抵御、响应及快速恢复供电能力的概念, 受到研究人员的认可和推广^[9-10]。通过韧性, 研究人员能从多个角度衡量不同应对措施对电力系统的效果, 进一步评估电力系统应对极端事件的能力。虽然电力系统韧性的相关研究取得一系列的成果, 但很少有学者明确定义韧性对电力系统和电力信息物理系统的意义, 且研究内容侧重于采用物理手段增强系统韧性, 欠缺通信因素对韧性的影响。

因此, 本文首先设计电力信息物理系统的典型框架, 定义电力系统韧性与电力信息物理系统韧性的共性与差别, 并分析电力信息物理系统韧性的意义; 其次参照信息流动路径提出数据源头-传输信道-通信受体的传输原理, 体现遭遇随机事件时常规通信技术与应急通信技术的作用, 根据传输信号类别分析通信技术的特点和发展趋势, 并在此基础上分析多种通信技术组网形成的信息网络的特点及不同类型极端事件对韧性的影响; 再次结合复杂网络理论揭示信息网络与物理网络的耦合方式及耦合机理, 从网络建模、条件设定、仿真控制和影响评估等方面归纳电力信息物理仿真研究方法; 然后根据电力信息物理系统各层次网络特点总结韧性提升策略的研究进展, 并将应急通信技术作为应对极端事件不可或缺的措施。最后指出未来电力信息物理系统的韧性研究面临的问题和挑战。

1 电力信息物理系统的韧性

受各种极端事件的影响, 电力系统停电事故频发, 暴露出电力系统应对此类事件准备不足、处理能力差的弱点, 韧性电网逐渐成为研究人员的共识, 其韧性的强弱程度已经上升至国家发展战略层

次^[11-12]。电力信息物理系统是电力系统基于信息物理系统理论, 通过物理实体互联、信息空间传递及系统资源协调、配置耦合形成的, 其韧性更是关乎国家的能源安全问题。

1.1 电力信息物理系统

电力信息物理系统是信息物理系统与电力系统融合后, 衍生出的一种形态, 其特点是依托精密测量、智能传感、可靠通信和自动控制等前沿技术, 将物理系统与信息系统耦合形成统一的智能电力系统。通过物理系统与信息系统紧密协作, 电力信息物理系统将实现精细化和信息化建设、强化资源优化和配置能力、提高安全稳定运行水平等。

典型的电力信息物理系统体系架构如图 1 所示^[13]。物理网络感知电力系统的物理参量, 实时收集电压、电流、风速和温度等数据, 并将这些模拟、连续的物理信息转化为数字、离散的信息数据, 转换后的数据一方面作为电力系统重要的数据支撑, 为系统提供高精度、细粒度、多维度、可靠的数据来源, 另一方面, 各种智能电子设备的泛在并网, 不同类型的数据、传输协议等异构互联构成信息网络的重要组成部分; 信息网络将被嵌入式系统处理的信息数据在信息空间中进行传输, 采用有线通信的方式保证信息流在物理网络中可靠传输, 将处理情况以指令的形式反馈给业务中心, 实现对具体物理设备的控制, 并以此为基础开展需求侧的服务业务应用、拓展等; 业务中心接收指令后, 实时分析具体物理设备的行为和状态, 主要依托指令动态配置设备、系统稳定运行所需资源, 并通过自动控制、物

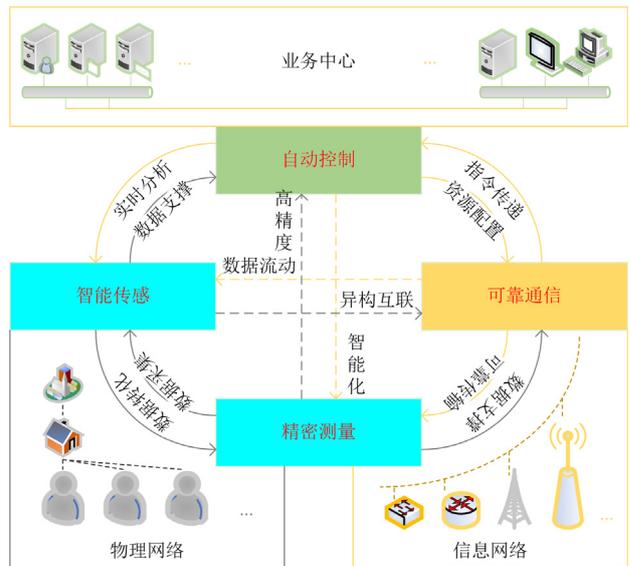


图 1 电力信息物理系统的典型架构

Fig. 1 Typical architecture of the cyber physical power system

理网络与信息网络的有机协调, 使电力系统呈现高度智能化。

这意味着, 电力信息物理系统与 CPS 核心概念一致, 均聚焦于计算、通信、控制。具有计算与通信功能的设备构成系统的基础架构, 实现对外界环境的观察和监测, 具有控制功能的设备作为系统核心, 通过建立物理进程与信息空间互相影响的机制, 实现计算、通信、控制的深度耦合, 提高客观系统的安全性、可靠性、可用性、适应能力和智能化程度, 其主要特点是:

- 1) 物理网络与信息网络是深度耦合的, 互相影响、互相协调;
- 2) 系统观测到的外界环境具有显著的时间和空间特点;
- 3) 面对复杂多变的外界环境, 系统可以通过通信将计算、控制紧密地联系起来;
- 4) 系统可以随着外界环境进行动态调整, 具有自适应、重配置的能力;
- 5) 系统满足实时性、安全性、可靠性、稳定性等方面的要求。

区别于一般概念意义的 CPS, 电力信息物理系统在前沿技术推动下其特点更加显著: 一方面电力信息物理系统重视通信技术的作用, 具备功率小、速度快、延时低、支持泛在组网、万物互联等特点的通信技术大幅提升电力系统的运营水平, 电力服务水平更加优质, 各种新型电力业务的发展和挖掘更为可信; 另一方面, 基于通信技术构建的强耦合网络架构上, 电力信息物理系统不光考虑物理网络与信息网络交互过程中更多的因素, 比如清洁能源出力波动对系统脆弱度的影响、输电线路加固对运维复杂程度的影响, 还考虑物理网络、信息网络与业务中心交互的影响, 比如应对极端事件时应急电源车的路径规划, 或者是应急通信资源的配置, 其突出特点是:

- 1) 分布式能源、电动汽车、智能传感等设备大量并网, 数据采集多样化、信息传递泛在化, 信息物理耦合的范围更加广泛;
- 2) 大量物理设备的接入刺激信息网络的发展, 高效的通信技术简化物理设备的接入、互联方式, 信息网络的集成及共享更加全面;
- 3) 电力操作人员基于信息物理耦合, 通过信息网络的交互、反馈参与到电力系统的各级决策中, 实时识别、自动控制、动态优化系统信号, 电力系统安全及预防机制更加健全。

1.2 电力信息物理系统韧性的概念

韧性最早由生态学家 Holling 提出, 用于衡量

生态系统可持续性、吸收变化和扰动后维持种群关系的能力。此后, 韧性从生态学逐渐扩展至物理学、心理学、工程系统等领域^[14-15]。在电力系统中, 多家政府或研究机构均各自定义韧性的概念^[16-17], 如韧性是衡量电力系统对扰动快速灵活响应的能力^[10], 而具有韧性的电力信息物理系统, 不仅具备应对随机事件并快速恢复至正常运行状态的能力, 而且能通过合适的手段、行动、策略等方式应对随机事件造成的系统脆弱性。

进一步, 本节从系统功能性分析的角度展示电力系统、电力信息物理系统应对极端事件的过程和韧性水平。系统的韧性曲线如图 2 所示。其中横坐标为时间, 代表系统应对极端事件的演变过程, 纵坐标为系统功能函数, 代表系统的运行水平, 系统功能通常选择负荷、供电功率或供电收益, 绿色阴影部分的面积反映了电力系统应对极端事件的韧性, 面积越大代表电力系统的韧性越弱。

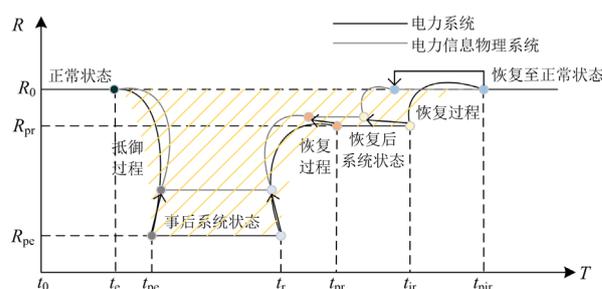


图 2 系统的韧性曲线

Fig. 2 Resilience curve of the system

极端事件预发生期间(t_0 后), 电力系统面对可能发生的极端事件进行预防: 采用物理手段加固输电线路等, 电力系统功能处于初始状态 R_0 , 系统内各设备运行状态正常。当发生具体的极端事件后(t_c 后), 受影响范围内出现线路损坏、供电不足、通信中断等情况, 导致电力系统功能快速下降, 但由于受灾范围无法覆盖整个电力系统、电力系统具有预防和承受能力, 系统功能在 t_{pe} 时刻稳定在 R_{pe} , 并以不完全的状态运行。在 $t_{pe} - t_r$ 期间, 电力系统通过数据测量、实时分析、用户反馈等方式, 对极端事件影响范围内的物理实体进行恢复, 如配置应急电源、应急通信, 此时系统功能在 t_{pr} 时刻恢复至 R_{pr} 。由于受影响物理实体会出现彻底故障, 短期内无法通过资源配置、调度优化的方式恢复至正常水平, 必须派遣维修人员进行物理修复, 因此系统功能在 $t_{pr} - t_{ir}$ 期间只能保持相对较高的水平运行。随着物理实体的维修、更换等, 与之关联的功能逐渐

完好并恢复至正常水平，系统功能也逐渐恢复至初始状态(t_{ir} 后)。电力信息物理系统应对此类事件时，其系统性能也可以划分为预发生阶段、受灾阶段、系统退化阶段、快速恢复阶段、恢复阶段等，其韧性曲线近似表现为多阶段变化的梯形曲线。因此，电力信息物理系统韧性与电力系统韧性的核心概念保持一致：韧性是衡量系统应对扰动事件的预防能力、抵抗能力和恢复能力^[18]。

不同于电力系统的韧性曲线，电力信息物理系统受此类事件影响小，受到影响后能维持相对较高的运转水平(在 t_{pe} 时刻系统功能水平高于 R_{pe} ，在 t_{pr} 时刻系统功能水平高于 R_{pr})，并能在较短的时间内恢复至正常($t_r - t_{pr}$ 、 $t_{ir} - t_{pir}$ 、 $t_e - t_{pir}$ 过渡时间变短)，这是由于信息物理系统的深度耦合、信息空间和物理实体的高度关联使得受影响范围内异常设备的功能具有可替代性，强化了电力信息物理系统的稳定性，另外智能传感、可靠通信等环节中采用的前沿技术使得物理实体状态、信息空间流动具有更强的可控性，增强了电力信息物理系统应对各种未知事件的承受能力，最终的执行单元呈现高度的智能化，极大地提高了电力信息物理系统的安全性和可靠性。

以极端事件中台风、地震等灾害为例，文献[19-21]考虑电力系统在灾前预防、灾中响应、灾后恢复等阶段的韧性提升方法，但并未深入考虑信息在极端事件中的影响和作用，而电力信息物理系统兼顾信息网络与物理网络，根据电力信息物理系统中通信技术及配套基础设施的特点和作用，分析信息系统与物理系统耦合的机理及影响，降低各种不利因素对电力信息物理系统的影响，增强系统的可控可观性。

这意味着电力信息物理系统中大量接入的物理设备、信息设备不仅增强系统整体的韧性，而且拓展韧性的适用性：一方面，电力信息物理系统中接入的大量信息设备增加系统面临的风险，如信息网络中通信监测信号故障造成的停电事故、业务中心下达的控制指令被恶意篡改导致系统异常动作等，或者信息设备、物理设备出现的单向运行事故通过信息物理系统的耦合双向扩散，诱发事故进一步恶化；另一方面，电力信息物理系统中引进的采集、通信、计算、资源部署等先进技术降低了系统状态监测、设备整合和调度的难度，填补电力系统应对信息网络、信息物理网络威胁的监测空白，由此形成不断扩大的系统参量数据集将深度揭示物理网络、信息网络、业务中心的关联，为全面提升电力信息物理系统韧性提供关键性的数据支撑，在此基础上从需求建模、控制分析、算法优化等角度结合

人工智能、自动控制等技术实现系统实时监测、控制和配置，降低系统面临的各种风险。

韧性对电力系统和电力信息物理系统的意义如表1所示。电力系统从荷、网、源、储4个角度衡量系统的韧性，采用可靠性、协同性、鲁棒性等指标评估在设想的常规事件和极端事件场景下所有设备面对扰动时的运行状态^[22]，具体扰动事件有电压失调、潮流越限等概率大、影响小的常规事件，也包括台风、大雪、地震等概率小、影响大的极端事件。电力信息物理系统主要从攻击、防御和保护的角度考虑具体的电力应用面临的虚假数据攻击、拓扑篡改攻击、拒绝服务攻击等攻击形式，通过信息检测、物理检测、信息物理协同检测的方式实时发现系统遭遇的攻击行为，便于实施保护措施，提升系统的安全防护能力^[23-27]。

表1 韧性对于系统的意义

Table 1 Significance of resilience for the system

网络	角度	维度	对象	特点
电力系统	荷 网 源 储	可靠性	所有设备	随机
		鲁棒性		
		协同性		
电力信息 物理系统	攻击 防御 保护	可靠性	所有设备	随机
		安全性		
		脆弱性		

从系统构成上，电力信息物理系统韧性体现在能根据不同网络特点降低随机事件造成的危害：(1)通过物理操作的方式应对传感器、继电器、路由等设备出现损坏；(2)通过提高不同信息网络接口、通信协议及远程信息控制设备安全性，避免信息被窃取、操作；(3)通过制定统一的业务人员的操作规范及支撑厂商的设计准则，保障系统运行、控制的统一性和协调性；(4)通过强化信息网络与物理网络的协调控制，抑制单向或双向传播故障的扩散趋势，维护系统的监测和控制的完整性。

从时间尺度上可类比电力系统应对扰动事件的反应能力，将电力信息物理系统划分为事前攻击或事前预防、事中检测、事后防御3个阶段。面对无法准确预测的人为攻击或者蓄意攻击，电力信息物理系统采用加密、网络隔离等事前预防手段保证系统的完整性，通过可靠性、安全性、脆弱性等指标评价具体场景下发、输、变、配、用环节中系统的应对能力，基于偏差、特征等方面检测通信设备、通信协议、电力一次设备、电力二次设备、控制指令、测量数据中恶意行为或异常事件；对于未能预先防御或实时检测的网络攻击，系统可以从信息保

护、物理保护和信息物理协同保护的角度采用设备隔离、资源分配等策略调整、控制受影响设备的工作状态或系统的运行参数, 通过预期的控制效果维持系统的安全和稳定。

电力信息物理系统韧性衡量电力信息物理系统应对随机事件的预防能力、抵抗能力和恢复能力, 电力信息物理系统的韧性具有更高的实时性和更广的适用性。

1.3 电力信息物理系统韧性的意义

电力信息物理系统韧性的意义在于通过评估特定事件对电力信息物理系统的影响, 采用不同的方式降低或者消除特定事件对电力信息物理系统的影响, 提供科学、合理、高效的决策依据。

电力信息物理系统韧性不仅仅适用于极端事件(地震、冰雪、台风、人为攻击等), 还包括概率大、影响小的常规事件(线路故障等)。引入可靠性指标虽然可以准确衡量常规事件的影响, 但极端事件难以预测, 且极端事件中物理实体面临的环境更加复杂, 可靠性指标无法准确评估极端事件的影响。因此, 对于特定事件, 评估电力信息物理系统韧性时需要选择具体的系统功能(如输电线路投资费用、配电网关键节点供电功率), 评估此类事件对电力信息物理系统的影响。

此外, 对于具体的电力信息物理系统网络, 其韧性研究的重点不同: 输电网的主要任务是保证电能的正常输送, 侧重于输电网络结构优化、场景规划、连锁故障分析及定位等方面, 应对电力数据采集系统、能量管理系统、广域测量系统面对的拒绝服务攻击、虚假数据攻击、数据篡改攻击等, 强化输电网的预防能力和抵抗能力, 通过事前和事中的应对措施降低特定事件带来的影响; 配电网面临远动控制信号、负荷管理信号、用户用电信号等在实时性、准确性和完整性等方面的攻击, 主要任务是保证电能的正常供给, 侧重于关键负荷供电状况、网络资源部署、调度、配置和电力市场效益, 强化配电网的应对能力, 通过事后的恢复措施提高配电网的灵活性。

2 计及通信的电力信息物理系统韧性分析

作为电力信息物理系统的重要组成部分, 信息网络由多种通信技术互联互通、组网并网形成, 为数据、指令以信息流的方式在网络中传递提供基础性的支持, 是实现电力信息物理系统的数据感知、传输和控制的前置条件, 即通信环节将决定电力信息物理系统韧性策略的制定。一旦遭遇极端事件, 通信环节出现的异常因素将直接影响电力信息物理

系统的抵抗能力和恢复能力, 使得系统更加具有不确定性, 分析电力信息物理系统的通信基本原理、网络构成等能降低通信对电力信息物理系统韧性的影响。

2.1 传输原理

通信原理示意图如图3所示。电力信息物理系统中各类通信技术依赖于数据来源提供的数据支撑, 传输媒介提供的传输信道, 并由位于末端的通信受体接收通信信号。

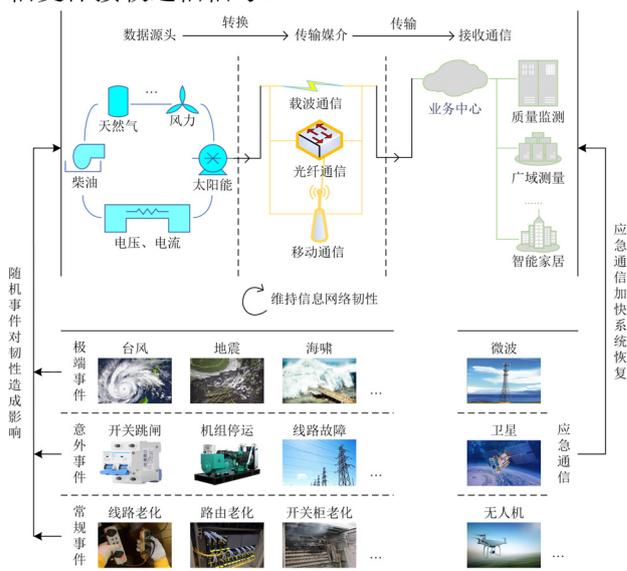


图3 通信原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the communication principle

数据来源包括传统发电站的油气构成、输电线路末端接入的新能源机组出力(风力、太阳能)、变电站内的温湿度以及用户或设备的用电情况, 根据这些环节的结构特点和检测原理, 形成高度集成的设备终端, 并在不同时间周期内、不同工作环境下对采集的预处理数据进行转换, 为信息网络提供高质量的系统状态数据。

传输信道作为信息流动的载体, 不仅缓解海量采集数据的传输压力, 而且在能保证数据辨识精度的前提下降低系统的信息载荷, 保证不同场景中信息网络的可靠交互。考虑电力信息物理系统的特殊性及其终端的多样性, 信息网络逐渐形成载波通信、无线通信和光纤通信的传输模式, 进一步提升终端-业务中心的连通和互动。

基于接收的终端量测数据, 业务中心通过物理网络的状态数据、信息网络的信息数据实现对电力信息物理系统的智能感知, 方便电网人员在物理网络与信息网络互相作用的过程中分析电力信息物理系统的特征, 并为电力人员或数据后台提供预测性

的评估结果。同时考虑到具体业务的需求(如电能质量监测的采集粒度),业务中心将决策的控制结果通过信息网络作用在设备终端,极大地增强电力信息物理系统安全性、稳定性。

由于传输信道不可避免地受到外界环境干扰或者人为攻击,可能造成传输前后信息不一致,扰乱系统的安全稳定运行,因此评估通信技术的质量十分重要。一般评估指标有频带的数量、带宽,信道中包含的频带数量越多、转换后信号的带宽越小,该通信技术传输的质量越高。电力信息物理系统对通信技术的要求体现在传输速度和传输时间上,单位时间内传输信息量越多、传输时间越短,通信性能越好,不同的通信技术由于搭载的信息载体不同,对于这两类指标的数值量级存在区别。常规信号的要求见表 2。

表 2 通信传输时间需求

Table 2 Communication transmission time requirements

信号类别	时间级别	带宽/s	通信方式
输电传输	h	Mb	电力载波通信
运行记录	min	Mb	
数据监测	min	Mb	无线通信
调度控制	min、s	Gb	
广域测量	s、ms	Gb	光纤通信
紧急控制	ms	Gb	

当电力信息物理系统遭遇具体的随机事件影响时,风险事件作为各种因素综合作用下引发系统故障的集合,其发生的概率具有一定的随机性,短期内电力信息物理系统能快速恢复至正常运行的状态,如发生开关意外跳闸等情况时,区域内用户用电受到限制,但对整个地区影响不大,业务中心能通过工单、在线反馈等方式精准定位,快速维修,实现用户分钟级复电;危害事件发生概率服从特定分布,业务中心基于历史运维数据、检修日志等采用提前维护、更换潜在故障设备的手段,能大幅降低设备老化对电力信息物理系统韧性的影响。因此,以载波通信、光纤通信、移动通信为主体的信息网络在能保证核心区域通信正常的前提下,降低风险事件和危险事件对系统韧性的影响,此时,传输媒介均能维持信息网络的韧性。与风险事件、危害事件等常规事件不同,极端事件往往伴随着系统出现大规模的不可逆损坏,常规通信技术将无法继续提供正常的通信服务,而应急通信作为特殊的通信技术,通过微波通信、卫星通信、无人机通信等保障受灾区域的正常通信,并依托于现场应急调度中心提供系统快速恢复的支持服务,此时应急通信作为

主要的通信技术,扮演着十分重要的角色。随着系统功能从快速恢复阶段逐渐过渡至恢复阶段,应急通信逐渐转变成辅助常规通信恢复的手段,在系统完全恢复至受灾前的状态后,应急通信将从已有的信息网络架构中独立,并将其作为未来应对极端事件的特殊手段纳入业务中心的应急资源储备中。

2.2 发展过程

参照图 3,电力信息物理系统的通信性能评估参数整体上能提高通信的可靠性、加快信息流的双向流动,而不同通信技术传输媒介将局部影响信息网络的运行状态。经历电力载波通信、无线通信及光纤通信等发展阶段的信息网络,将为电力信息物理系统的通信管理、质量服务、信息安全等问题提供解决方案。

2.2.1 电力载波通信

电力载波通信是一种将包含数据信息的高频信号加载至电流上,并利用电力线作为传输媒介的通信技术,它不但不涉及基础设备的改造或升级,而且满足不同电力系统间信息传输要求,在经济性、便捷性等方面表现出显著的优势。

从 20 世纪 40 年代开始,电力载波通信逐渐开始应用在电力通信之中,不断发展、演变出输电线路载波通信、配电线路载波通信和低压配电线路载波通信^[28]3 大类。随着技术的不断进步,电力载波通信在传输采集数据、业务指令信息、语音、视频和保证正常电力供应的前提下,能提高传输速率,拓展应用范围,所以被广泛用于用电信息采集系统、电力设备保护及监控系统中。

2.2.2 无线通信

无线通信是一种利用电波的传播特性进行信息交换的通信技术,它不依赖电力线等有线传输介质,在投入使用时架设满足通信要求的天线便能快速组成信息网络。随着技术的迭代更新,只需更换或者新增通信设备即可实现新技术的拓展接入,具有成本低、组网迅速、拓展性好的特点。

无线通信从 1978 年贝尔实验室发明蜂窝移动通信系统以来^[29],维持每间隔 10 年推出新一代通信技术的速度,每一代通信系统都能带来革命性的变化。如 1G 通信支持语音通信,2G 通信支持语音和数据通信,3G 通信支持多媒体信息通信,4G 通信支持语音至视频的高质量通信,而 5G 通信将传输速度、系统容量、频谱效率等性能的指标提升了 10~100 倍,促进了信息网络的发展。结合电力信息物理系统的具体场景,具有高带宽、大容量、低延时等特点的 5G 通信将满足不同电力系统的控制需求。

2.2.3 光纤通信

光纤通信是一种将信息加载至光信号上, 通过光纤传输信号的通信技术, 其单行信道传输速率可达 100 Gb/s, 传输带宽可达 100 Tb/s, 约为 5G 通信的 5 倍。不同于前两种通信方式, 光信号在传输过程中会经过光纤中继器进行二次放大, 即能避免接收光信号时出现误码, 又能实现长距离的通信传输^[30]。更为重要的是, 光纤通信不易受电磁干扰, 保密性能良好, 满足复杂的电力信息物理系统中信息网络对通信技术的要求。

随着光纤通信技术的不断发展, 信息网络将由电力载波通信、无线通信逐渐过渡到光纤通信, 未来的信息网络将是由同步数字体系主干网络、光纤以太网、异步光纤环网、无源光纤网络等构成的复杂信息网络。

2.3 网络构成

不同的电力通信技术具有不同的优势, 构建电力信息物理系统的信息网络时, 需要综合考虑用电人员的服务体验、电网人员的业务分析和电力信息物理系统稳定运行的需求, 合理选用具体的通信技术。例如设备终端与用户直接相连时, 对通信速度要求较低, 适合采用成本低廉的电力载波通信技术, 升级、改造后的低压电力载波通信有利于智能家居系统的组网; 设备终端与各种发电机组、输电线路相连时, 电网人员参考电能数据判断电能的供应情况, 传输容量大、通信质量高的光纤通信技术能为电网人员提供可靠的数据来源, 确保不同条件下电能的正常供应; 而当电网人员对电力信息物理系统下达电力调度、线路切换等业务指令时, 可以根据不同业务特点选择合理的无线通信技术来实现。

多种电力通信技术通过组网连接的方式形成如图 4 所示的信息网络, 实现系统整体的信息传输和互动。接入网作为最基础的网络, 主要为系统数据提供接口, 包括设备终端、发电机组、输电线路的初始参数和与系统运行相关的状态信息, 将其转化为符合传输要求的通信格式。传输网对接入的数据预处理, 增强数据的流通能力和抗干扰能力, 完成整个电力信息物理系统数据和信息的传输, 并通过信息交互进行分类、存储, 提供可靠、准确的数据支撑。业务网基于大量的数据对系统进行分析和控制, 通过信息交互将用户、设备终端、电力信息物理系统整合为一体(如制定统一的数据交互标准和方式、实时同步系统通信时钟)。

接入网将电力载波通信作为主要的通信手段, 满足以家庭为单位小型用户的日常业务需求。传输网采用光纤通信为主、无线通信为辅的通信模式保

证通信质量, 而应急通信技术的应用进一步强化信息遭遇极端事件影响时的韧性, 一旦某个传输网络故障, 通过卫星通信、无人机通信能迅速解决该区域的通信问题。业务网根据设备运维、运行调度、客户营销、安全监督、工程建设等核心业务的需求, 提供线路继电保护、功角测量、通信监控、生产管理等网络服务, 促进四遥、视频监控、网络会议等新型业务的诞生。

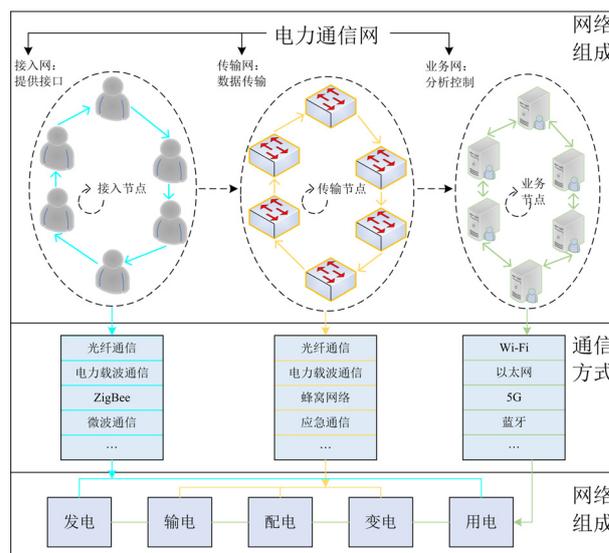


图 4 信息网络的构成

Fig. 4 Structure of the cyber network

由此可见, 信息网络逐渐发展为以光纤通信为主、无线通信为辅、电力载波通信为补充的通信混合组网, 保证电力信息物理系统安全稳定运行。随着通信技术的不断发展和应用, 未来电力信息物理系统信息网络将逐步发展成为一个涵盖海、陆、空, 具有高度数字化、信息化、综合化的一体化信息网络, 实现电力通信的全区域覆盖和电力业务的可靠服务。

2.4 影响分析

信息网络的层次结构决定通信技术始终贯穿整个电力信息物理系统, 信息网络的实体设备随之延伸至电力信息物理系统的末梢, 因此信息网络与电力信息物理系统联系紧密, 信息网络直接影响电力信息物理系统的运行状态, 并随着系统智能化的提升, 信息网络对系统韧性的影响愈发明显。

一方面, 信息系统受到发生概率大的一般事件影响, 容易发生误码、错码等情况, 电网人员因无法准确判断电力设备的运行状态, 在调度过程中会优先切除该区域所有电力供给, 造成不必要的经济损失。信息系统受到发生概率小的极端事件影响,

单个通信设备的物理实体故障后容易诱发多个通信设备的连锁故障，电网人员将认为该区域所有实体设备均故障，占用大量的维修资源。信息网络的连锁故障还可能通过信息网络与物理网络的耦合关系，造成一系列实体设备故障、扩大影响范围。

另一方面，电网人员与物理设备的交互离不开信息网络。电力信息物理系统受到异常事件影响后，电网人员需要依赖信息网络获取该区域物理设备的状态，信息网络的故障需要运维人员在现场人工获取所需参数、排查故障原因，极大地延迟了受灾后电力信息物理系统的故障检测、定位，而且模糊的运维人员配置方案对现场作业人员的综合素质要求较高，进一步迟滞灾后系统的恢复过程。另外，物理网络的物理设备受到极端事件影响后，会降低系统状态感知的精度，电网人员可以通过信息网络设定临近区域物理设备的工作状态，短时间内将故障区域设备的业务需求分解至临近区域设备，抑制故障的扩大。结合两方面可知，极端事件影响下，物理网络与信息网络的耦合作用关乎电力信息物理系统的韧性。

以台风、地震、海啸等极端事件为例分析其对电力信息物理系统韧性的影响，如表 3 所示。由于此类极端事件的不可预知性，电力信息物理系统的准备不足，导致电力基础设备在受灾过程中出现大规模的故障：大量的物理设备与通信设备受到直接或者间接的损坏，正常的电力供给无法保障，通信传输质量断崖式下降，由此引发物理网络与信息网络的连锁故障，对电力信息物理系统的韧性构成严重的威胁。业务中心虽然可以采取实时应对策略如压减负荷、线路切换等，但短时间内无法有效地阻止受灾情况的恶化。灾后系统用户及从业人员依赖通信设备或现场排查等途径获取受灾情况、恢复进展等信息，但激增的通信服务需求、车辆调度需求可能造成物理网络与信息网络的拥塞，迟滞电力信息物理系统韧性的恢复进程。

表 3 极端事件的影响

Table 3 Impact of extreme events

网络类型	事件类型	具体差异	整体表现
接入网	台风	通信设备失电	灾前缺少充分的准备，灾中大规模的通信设备遭受严重损坏，通信质量大幅度降低，灾后通信服务需求激增
	地震	通信设备震落	
	海啸	通信设备宕机	
传输网	台风	通信失灵	
	地震	通信线路中断	
	海啸	通信数据丢失	
业务网	台风	通信调度频繁	
	地震	通信数据异常	
	海啸	通信服务滞后	

虽然不同类型的信息网络应对极端事件的整体表现基本一致，但具体的极端事件造成的影响不同。如接入网直接面向广大的电力用户，通信设备一般具有备用电源，当馈线受台风影响故障后，通信设备能维持基础的通信功能，随着备用电源耗尽，通信设备将处于失电的状态；传输网在台风的影响下，容易出现通信失灵的情况，导致业务人员难以准确评估受灾通信设备的真实状态；为此，业务网需频繁下达通信调度指令，一方面保证通信设备正常动作的准确率，另一方面提高通信的可靠性。当地震发生时，接入网中通信设备受到不同程度的震损，出现震落、移位、变形等情况；传输网受到倒塌的杆塔、滑落的碎石等因素影响，部分通信线路关断，业务人员无法进一步掌握受灾区域的具体情况，而依靠地理位置获得的通信数据无法反映真实的情况，业务人员需要综合考虑通信设备震损与人员流动，分析震后通信数据的异常变化，确定受灾区域的通信异常状态，辅助抗震救灾。特别地，实际情况中单个极端事件往往伴随其他类型的极端事件，如台风过后的暴雨、地震引发的海啸，表 3 所列的极端事件可视为不同极端事件的组合。

3 电力信息物理系统建模研究

信息网络与物理网络的交互是实现电力信息物理系统协调统一的基础：设备终端的互联保证信息通信的质量，信息的高速传输强化系统智能控制，增强电力信息物理系统的适应性。但是，大量接入的设备终端和流动的信息暴露在自然环境中，电力信息物理系统不可避免地受到潜在的干扰因素或意外情况影响，电力信息物理系统面临严峻的安全挑战。因此，在采用耦合建模和电力仿真的基础上，综合分析信息网络和物理网络在受灾过程中互相作用的关系，更加有利于提升电力信息物理系统的韧性。

3.1 电力信息物理耦合

电力信息物理系统耦合建模方式如图 5 所示。将物理网络和信息网络简化为不同的节点网络，节点 A 代表物理网络中的物理节点，节点 1 代表信息网络中的信息节点，节点间互相依存关系代表网络间的耦合情况，节点间互相依存状态关乎网络间的耦合强度，节点间互相依存函数映射网络间的耦合方程，并在特定的场景下建立可直观分析的数学方程。

如图 5 所示，根据复杂网络理论，物理网络与信息网络的耦合方式分为逐点对应耦合、多连接边耦合、多互联边耦合、考虑实际因素耦合。

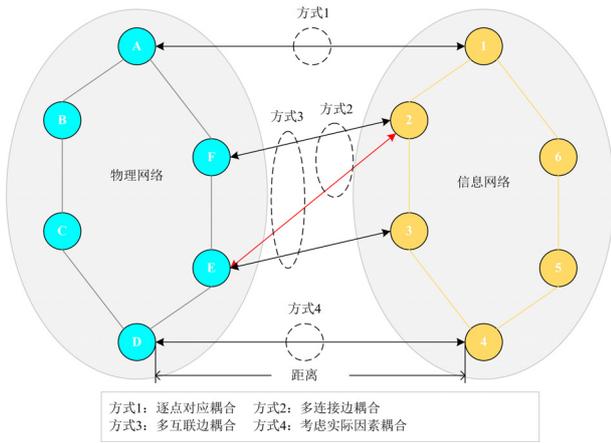


图5 物理网络与信息网络耦合方式

Fig. 5 Coupled way of the physical and cyber networks

信息节点依赖物理设备提供电能供给, 物理设备依赖信息节点提供指令控制, 可见信息网络与物理网络节点并不是随机耦合, 而是符合此类特征的节点更加容易产生逐一对应的依存关系: Parshani 等发现逐点耦合方式应对意外情况时具有较强的抵御能力, Buldyrev 等指出采用逐点耦合构建的依存网络稳定性优于随机耦合方式^[31-32]。

在物理网络或信息网络中, 与其他节点连接较多的节点, 易同时与另外网络中多个节点建立依存关系, 形成多连接边的耦合关系。相比于随机耦合, 采用多连接边耦合可以增强耦合网络的韧性, 且物理网络和信息网络的框架越相似, 电力信息物理系统韧性越强^[33-34]。必要时, 人工增加连接边也能增加电力信息物理系统的韧性, 例如在市区输送电能时, 增加多个输电线路。

当物理网络和信息网络中均存在多个连接边的节点时, 将形成互联边强化这些节点的关联关系^[35-36]。面临随机事件影响时, 该耦合方式增强电力信息物理系统的韧性, 其效果显著高于逐点对应耦合、多连接边耦合, 遭遇针对性事件影响时, 电力信息物理系统的韧性曲线随着该耦合方式频次的增加呈现出先增强后减弱的现象; 一旦超出临界耦合强度, 电力信息物理系统更加容易崩溃。

上述3种耦合方式并未考虑实际电力信息物理系统物理设备和信息设备的实际情况, 因此将距离、线路阻抗、传输容量等具体信息代入电力信息物理系统, 采用更加贴近实际系统情况的耦合方式更具有研究价值^[37-38]。根据网络间节点依存距离的长短, 业务中心能准确衡量网络的脆弱程度: 距离越长, 网络越脆弱, 一旦遭遇极端事件, 网络中部分节点失效, 并耦合、扩散、传播至电力信息物理系

统中, 引发一系列的故障, 而合理部署节点的分布能减轻连锁故障带来的恶果。此外, 业务中心通过分析机组出力、线路阻抗、线路功率传输容量、线路输电能力、节点分布差异性指标对电力潮流的影响, 克服网络忽略实际物理设备和通信设备电气特性的局限性, 提高电力信息物理系统预防局部故障的能力。

复杂网络的耦合机理如图6所示。根据电力信息物理系统的实际应用情况, 复杂网络作用于具体对象时耦合机理不同。

1) 根据电力电子设备的结构和控制模式建立复杂网络矩阵, 结合传感器、控制器、集线器等核心元器件运行状态, 形成具有电力电子设备数据特点的属性矩阵, 通过矩阵整合、提取、加权等方式分析设备正常运行状态、不同故障下运行状态及完成指定动作状态。

2) 根据信息网络的通信序列、物理网络的输电性能及网络的电气参数、结构、行为等, 形成表征其特点的复杂网络矩阵, 通过测试、量化网络的结构信息等方式揭示信息网络、物理网络的关联特性, 通过分析不同因素的影响等方式制定以高效通信、高效运输为目的的策略。

3) 根据电力信息物理系统拓扑结构、节点和线路特点、功率流动方向, 形成反映系统内在特性的复杂网络矩阵, 分析节点与节点、节点与线路的连接关系, 考虑系统在实际运行中存在的各种风险, 建立满足不同需求的数学模型, 通过引入电气特性约束、功率传输约束等评估系统的脆弱性。

4) 根据电力信息物理系统在发、输、配、变、用等环节的实际运行机理, 形成基于拓扑结构的整体复杂网络矩阵, 综合考虑不同故障、因素、需求对系统韧性的影响, 通过全局指标和局部指标的加权评估随机事件对系统的影响, 从而增强系统运行的安全性和可靠性。



图6 复杂网络的耦合机理

Fig. 6 Coupling mechanisms in complex networks

复杂网络根据电力信息物理系统的层次需求不同其使用目的不同: 设备层次目的在于通过复杂网络检测故障并定位; 网络层次目的在于通过复杂网络提高系统传输和通信能力; 系统层次目的在于通过复杂网络辨识系统脆弱设备, 便于业务人员采取预先加固的措施; 标准层次目的在于通过复杂网络

评估多种措施对系统韧性提升的效果，但总体的研究思路保持一致，均需依赖复杂网络矩阵为基础，并考虑系统实际情况做进一步分析。而现有的电力信息物理系统耦合具体建模方法包括布尔表达式、图论等^[39]，基本采用逐点对应的方式反映网络间的耦合关系，无法细致分析实际情况中耦合情况，融入其他耦合方式后可以弥补这些方法的劣势，但增加了求解、分析的难度。因此，如何权衡耦合方式和计算耗时的关系，表征电力信息物理系统互相的依存关系，以此映射电力信息物理系统的韧性，将是下一步研究工作的重点。

3.2 电力信息物理仿真

通过电力信息物理系统的耦合建模，电力信息物理系统的感知、分析、控制等环节由物理网络和信息网络共同作用，信息网络的运行状态将对电力信息物理系统的运行产生重大影响。作为研究电力信息物理系统建模的另一种方法，电力信息物理仿真重复执行物理网络和信息网络的控制指令，模拟电力信息物理系统在不同场景下的状态参数，通过分析电力信息物理系统实时运转的过程，为电力人员提供准确可靠的仿真结果。

电力信息物理耦合仿真架构如图7所示，主要分为：网络建模、条件设定、仿真控制、影响评估。网络建模和条件设定模拟物理网络和信息网路的对象和具体动作，仿真控制使用各种仿真工具模拟物理网络和信息网路的变化过程，影响评估提供具体的参数，分析不同事件对电力信息物理系统的影响。

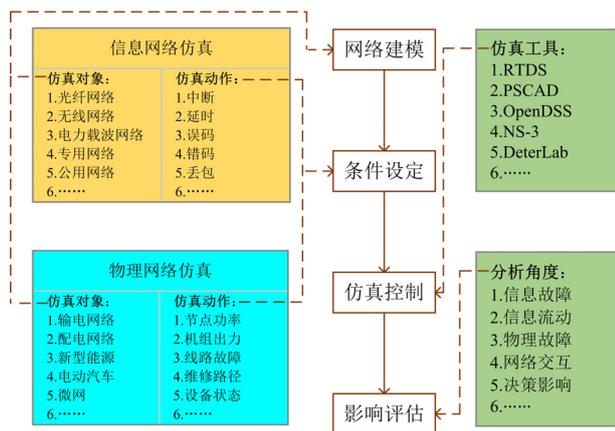


图7 电力信息物理耦合仿真架构

Fig. 7 Architecture of cyber physical coupling simulation

物理网络根据网络结构、线路潮流、机组出力等建立仿真模型，将输电网络、配电网络、新型能源等作为具体仿真对象，模拟节点功率波动、机组出力、线路故障状态等条件变化对系统的影响，并

将网络受灾、线路状态、设备工况等情况反馈至业务中心，如遭遇极端事件影响后出现节点因电力供给不足导致被切除、发电机组停运等情况。业务中心分析此类情况产生的影响，下达潮流调度、维修配置等指令调整网络、线路、设备的运行状态，如通过线路切换、电力强送等方式保证受灾区域的电力供给，维持系统韧性。灾后业务中采取维修、应急部署等手段加快系统恢复，根据节点、用户重要程度等制定优化方案。常用的仿真工具有 PSCAD、Matlab、OpenDSS 等^[40]。

信息网络根据通信技术的特点、传输协议、互联网网的结构分布等建立仿真模型，将光纤网络、无线网络、电力载波网络等作为具体仿真对象，在物理网络发生的具体事件中增加通信因素，模拟误码、中断、延时等因素与设备实体融合后系统的状态，如遭遇极端事件影响后，输电杆塔倒塌、通信设备震落以及传输信息出现中断、延迟、误码等情况。业务中心基于接收劣质信息或无法接收信息，分析信息流对电力信息系统的影响并评估不同策略产生的效益，保证通信的实时性和可靠性，现场部署应急通信中心提供基础通信服务、搭建小型通信中心提高通信传输速度、设计云边通信架构缓解通信压力等，进一步与维修部门、救灾部门、商业部门协同联动，经过灾情评估、电力调度、指挥决策等环节，加快电力信息物理系统的恢复速度。常用的仿真工具有 NS-2、OPNET、OMNET+、SIMULINK 等^[41]。

进行电力信息物理系统仿真时，物理网络采集的数据信息在时间上呈现连续性，而信息网络传输的控制指令在时间上呈现离散性，时间尺度的差异会造成仿真时间上不同步。目前采用的主从方式、固定时间步长方式和全局事件驱动方式等时间同步方式，能反映设备、线路、通信信道、网络结构等在电力信息物理系统的运行过程，但如何进一步提高仿真的同步性和实时性将是未来研究的重点。此外，仿真时物理网络和信息网路使用的仿真软件彼此独立，研发一款兼顾两者建模对象特点、动作条件的仿真软件将利于推动仿真技术的发展。

电网人员从信息故障、决策影响等角度评估不同因素对电力信息物理系统的影响，如线路故障、通信延迟、网络攻击等。但是由于电力信息物理系统结构的复杂性，导致难以精确模拟物理网络和信息网路节点具体参数和动作，例如考虑多种通信技术混合组网时实际信息流动难以通过数学函数表示，仿真结果用于实际系统的科学性存疑。而且随着电力信息物理系统的规模不断扩大，单一、具体的模拟条件无法反映实际系统复杂多样的工作场

景, 综合多方面条件设定复合约束将不可避免地增加仿真场景, 加大电力仿真的工作难度。

4 计及通信的电力信息物理系统韧性提升

电力信息物理系统受到随机事件影响, 不同场景下物理网络、信息网络表现的特征不同, 电网人员采用的韧性提升手段不同。电力信息物理系统韧

性提升措施如图 8 所示。由图 8 可知, 遭遇随机事件影响时, 电力信息物理系统具有明显的阶段性, 可将其划分为灾前预防、灾中响应、灾后恢复 3 个阶段^[10], 采用如辨识系统脆弱节点、物理加固基础设施、调整设备状态、制定应急方案、控制节点功率、增设备用电源等措施。由于此类措施弱化通信对系统的影响, 韧性提升的效果有限。

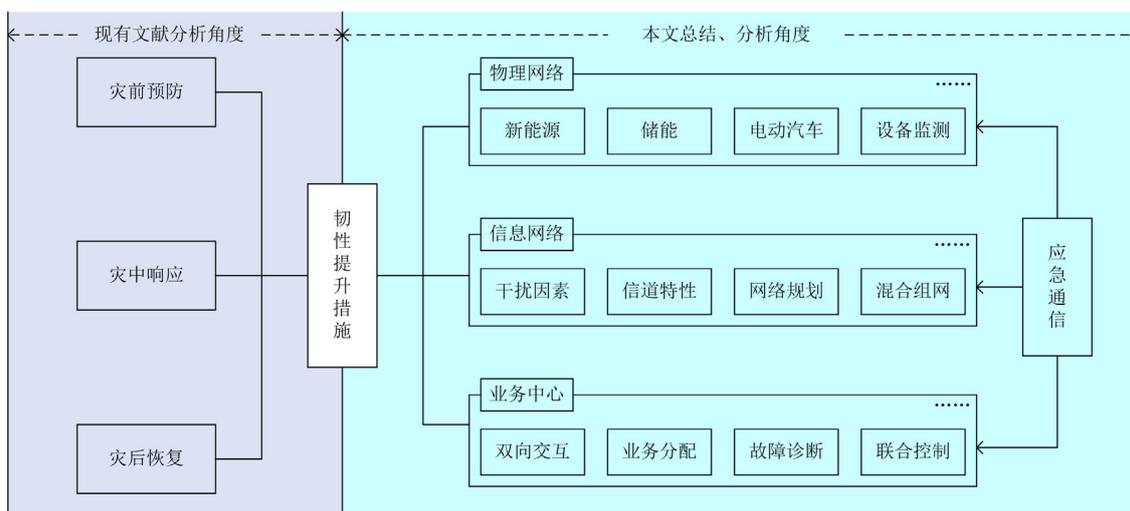


图 8 电力信息物理系统韧性提升措施

Fig. 8 Cyber physical power system resilience enhancement measures

因此, 本节在电力信息物理仿真的基础上, 根据电力信息物理系统的结构和特点, 从系统运行的角度总结、归纳考虑通信后各层次网络中电力信息物理系统的韧性提升方法, 并将应急通信技术作为一种重要灾后重建手段, 保证通信的有效性。

4.1 韧性提升

各层次网络韧性提升思路如表 4 所示。由表 4 可知, 电力信息物理系统各层次网络的韧性提升方法考虑物理网络、信息网络和业务中心的特点, 从不同的角度提供可供参考的解决方法。

物理网络主要表现在: (1) 使用通信技术将基站、用电负载、清洁能源出力等关联, 通过基站充电、放电状态调整机组出力、工作状态等, 提高光伏、风力等清洁能源的消纳率, 5G 等通信技术的使用降低基站、机组参与控制的功耗、成本; (2) 考虑极端事件造成严重的通信故障, 调整储能单元的荷电状态或制定储能单元应急方案, 降低通信故障对系统稳定运行的影响; (3) 电动汽车充电及充电桩配置离不开通信技术的支持, 考虑不同通信设备技术特点及应对随机事件能力, 提供高效的充电次序及科学的充电桩管理方式; (4) 研制监测装置, 分析各设备终端的状态, 并满足信息流动的传输需求和业

务应用需求; (5) 引入微网会造成各种通信问题, 制定适用于不同场景的协调控制策略, 提高系统稳定性。

信息网络主要表现在: (1) 分析噪声、人为攻击等对通信传输的影响, 为信息网络搭建、组网提供理论基础; (2) 建立信道传输数学模型, 尽可能模拟实际情况下不同通信技术的传输特性, 节省信道的投资; (3) 根据信息网络的规模、架构, 规划信息节点的数量和位置, 一旦出现通信故障, 及时整合信息节点的路由资源, 缓解信息网络的压力; (4) 分析通信技术的失效对系统的影响, 建立包括混合组网的数学模型, 结合成本、可靠性、失效概率等指标评价通信对系统的影响; (5) 模拟随机事件、通信故障等场景, 采用识别脆弱节点、形成脆弱矩阵等方式, 有针对性地保护系统薄弱环节。

业务中心主要表现在: (1) 根据业务中心与用电用户的业务交互需求, 搭建标准、规范的服务平台, 提高业务交互的效率; (2) 针对具体的业务, 提前预估、合理分配业务占用信道资源, 避免出现信息网络拥堵、崩溃等情况; (3) 一旦业务因极端天气影响无法正常交互, 通过调整系统网络拓扑、负荷快速专供、供电容量配置等方式, 加快信息网络和系统

表 4 各层次网络韧性提升思路

Table 4 Resilience enhancement ideas of networks

层次网络	研究内容	研究目标	文献
物理网络	消纳清洁能源	建立光伏出力与 5G 基站迁移模型, 实现负载和光伏的互补	[42]
		将 5G 基站纳入虚拟电厂, 抑制风力、光伏出力波动	[43]
	配置储能单元	考虑通信条件, 根据储能单元荷电状态调整负荷功率分配	[44]
		建立通信故障下储能优化模型, 调整备用储能出力策略	[45]
	电动汽车	根据充电桩的需求规划选择合适的通信方式	[46]
		建立智能电动汽车动力学模型, 消除通信延时、外部干扰的影响	[47]
	设备监测	输电线路状态监测及通信组网	[48-49]
	微网	考虑通信丢包和物理扰动, 引入事件触发机制完成电压控制	[50]
		通过协同保护策略避免因通信故障造成的保护失效	[51]
	信息网络	干扰因素	设计滤波器模拟频率对通信性能的影响
对比、分析不同的随机加边等策略强化信息网络的影响			[53]
信道特性		建立低压电力载波信道模型, 并修正模型参数	[54]
		建立基于局部反射理论的信道模型, 预测链路衰减	[55]
网络规划		构建路由重构模型, 实现路径可靠性与负载均衡的统一	[56]
		综合考虑经济性、 $N-1$ 原则进行接入点部署并缩短延时	[57]
混合组网		通过混合组网策略, 实现电力信息物理系统的规划统一	[58]
		建立基于混合通信网模型, 评价信息网络对系统的影响	[59]
节点辨识		定义节点的重要程度、脆弱程度, 评价信息网络对系统的影响	[60-62]
业务中心		双向交互	出于双向互动的需求, 提出分布式按需路由机制
	根据双向用电需求, 提出数据采集与通信控制的系统架构		[64]
	业务分配	根据业务特点进行流量分析, 提高网络吞吐量	[65]
		使用基于排队论的业务通信计算方法, 提高带宽利用率	[66]
	故障分析	基于通信失效时传输任务的状态, 构建风险评价指标	[67]
		受灾后, 通过物理网络与信息网络的交互快速恢复故障	[68]
	联合控制	通过信息网络和物理网络交互, 避免形成新的电力尖峰	[69]
		考虑通信延迟, 提出事件触发电压的协同控制	[70]

的恢复过程; (4) 为了实现具体的业务, 通过调整设备参数、网络分布等, 实现物理网络与信息网络的联合控制和优化, 规避潜在的业务风险。

整体而言, 物理网络的韧性提升方法侧重于采用灾前预先配置策略、灾中资源调整策略, 考虑系统设备线路状态、系统规模扩大带来的安全风险(例如引入新兴发电技术、储能技术带来的冲击)等因素, 并预先分配资源、实时调整, 通过提升应对随机事件的扰动能力增强电力信息物理系统的韧性。信息网络的韧性提升方法侧重于模拟受灾过程中不同通信技术对电力信息物理系统的影响, 分析随机事件作用于信道链路的首端至末端所有环节时呈现的特点, 采用小规模调整信道参数、大规模整合路由资源、指标评估等方式, 通过精准模拟信息网络受灾的变化过程指导电网人员制定科学合理的应对策略, 提高电力信息物理系统的应对能力。业务中心的韧性提升方法侧重于灾中的调整策略和灾后的恢复策略, 其主要目的是通过信息网络与物理网络的交互保证业务的正常交互, 通过提高电力信息物理系统的响应速度和恢复速度来增强韧性。

4.2 应急通信

受灾过程中, 电力信息物理系统受到极端事件影响, 大量的基础通信设备损坏或故障, 受灾区域内用户无法通过信息网络与业务中心互动, 业务中心接收持续性中断、波动的低质量通信信号, 无法制定科学的应急行动方案, 滞后的抢修工作将无法有效抑制受灾区域通信不断恶化, 造成损失进一步扩大, 而“十四五”规划明确提出“加强极端条件应急救援通信保障能力建设”^[71]。因此, 作为灾中响应和灾后恢复的支撑手段, 应急通信的重要性不言而喻。

应急通信是应对极端事件或人为造成突发情况的特殊通信手段。区别于 4.1 节设定的大多数场景(信息网络保证正常的通信), 应急通信默认发生极端事件后, 大规模的通信设备故障导致信息网络受到严重破坏, 无法满足用户与电网人员正常通信的需求。此时, 电网人员通过应急通信综合利用多种通信资源, 暂时性地创造或保障受灾区域的通信交互、救援求助、区域定位等所需的条件, 达到正常通信、灾情分析、紧急维修等目的。

应急通信主要研究方向如图 9 所示。根据电力信息系统层次结构,物理网络侧重于应急资源部署,文献[72]利用价值迭代算法获得最佳车载应急通信资源分配策略,在信息网络拥塞的情况下降低服务请求的拒绝率,文献[73]将卫星应急通信资源搭载在大型无人机平台上,使得无人机巡检应用不再受到飞行高度、地域条件的限制。信息网络侧重于应急网络规划,文献[74]分析应急通信的关键技术,文献[75]考虑信息网络的覆盖性和连通性,利用深度学习解决网络的拓扑结构规划问题。业务中心侧重于设计应急技术应用,将卫星通信、应急通信车、短波和超短波等技术应用至电力信息物理系统,例如美国全球星通信系统、华为公司的 GT800 系统等。

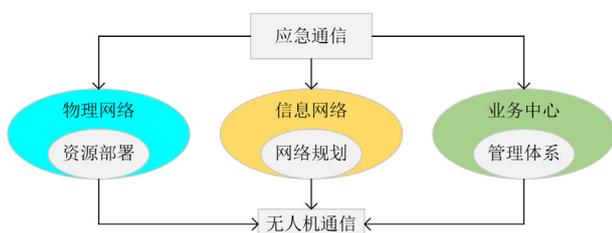


图 9 应急通信主要研究方向

Fig. 9 Major research directions in emergency communications

应急通信主要围绕无线通信、车载通信、卫星通信、数字集群通信等,抽象电力信息物理系统在受灾过程中的状态(分为正常、故障,或服从设定的故障概率曲线等),根据不同应急通信技术的载体和传输特点,建立多约束条件的组合优化数学模型,算法求解的结果作为电网人员应急调度指挥的理论依据。而随着设备制作工艺和通信技术的不断发展和成熟,嵌入电力信息物理系统中的应急通信技术将为电网人员高效决策和精准指挥发展更加重要的作用。

现有的主流应急通信技术是卫星通信技术,具有传输稳定、通信距离远、覆盖面积广等特点,但劣势主要体现在:(1)卫星通信技术用于密集城镇或乡村时传输效率有待验证;(2)大规模的受灾区域使得卫星通信难以及时满足不同区域内应急调度请求,严重时请求互相干扰,进一步加剧现场指挥中心的混乱程度;(3)卫星通信依赖现场终端的硬件条件,假若现场终端无法准确识别卫星通信频段,信息网络容易发生拥堵、无效传输等情况,造成额外的损失。

无人机通信技术具有支持实时动态组网、支持多频段通信、几乎不依赖基础设施等特点,能弥补卫星通信技术存在的不足。因此,在卫星应急通信网络中引入无人机通信作为辅助支撑技术,将充分发挥应急通信的作用。

引入无人机通信后应急网络结构如图 10 所示。

由图 10 可知,部署的无人机能提供不同的应急服务,维持物理网络、信息网络、业务中心在灾后的正常通信。

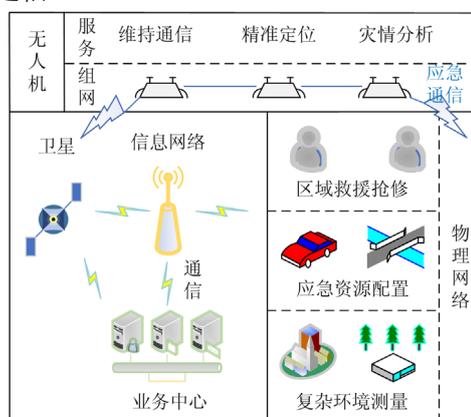


图 10 引入无人机通信后应急网络结构

Fig. 10 Network structure after the introduction of UAV communications

业务中心通过无人机机群组成的应急网络,及时接收受灾区域的用户请求,合理配置维修人员、科学规划维修路径,并综合区域受灾严重程度、用户请求紧急程度决定是否启动移动应急车。对于卫星拒止区域,搭载摄像头、红外感应等小型感应设备的无人机具备数据采集、处理、传输等功能,实时感知的现场受灾数据或图像将作为业务中心灾前分析、决策的重要依据,而搭载 GPS 定位芯片的无人机为业务中心提供位置信息,便于业务中心的协同调度。

根据“黄金 72 小时”原则,基于卫星通信技术的应急网络在最佳应对时间内能实现受灾区域的全覆盖,但此时电力信息物理系统受损非常严重,对通信技术的灵活性、实时性要求很高。无人机的推广能快速组网、快速收发通信信息并保障通信质量,且无人机较强的机动性,极大地缩短了电力信息物理系统灾后维修、重建等过程。无人机相关研究和应用及其具有的前瞻性,如表 5 所示。

表 5 无人机通信研究进展

Table 5 Research advances in UAV communications

研究概要	研究内容	文献
无人机部署	确定无人机的最佳定位	[76]
	确定无人机和移动终端的匹配方案	[77]
	通过聚类算法降低计算复杂度、网络能耗	[78]
无人机通信效率提升	通过云端实现无人机的信息共享	[79]
	优化无人机飞行路径	[80]
无人机融合开发及研究	实现感知时间、通信时间、轨迹规划、任务调度的联合优化	[81]
	联合优化无人机位置和功率	[82]

由此可见, 应急通信技术维持电力信息物理系统遭遇极端天气时通信正常, 通过应急网络的全区域覆盖保证全方位数据感知, 通过使用各种灵活组网的应急通信技术增强系统应对能力, 通过高质量、高可靠的通信传输保障系统各种应急策略的实施效果, 应急通信技术将是提升电力信息物理系统韧性不可替代的措施之一。

5 未来挑战

综上所述, 考虑通信对电力信息物理系统的影响的研究和应用初具规模, 但欠缺深入挖掘通信与系统韧性提升策略间的关联。根据电力信息物理系统的建设需求和新兴技术的迭代周期, 未来电力信息物理系统的韧性研究将面临以下问题:

1) 高比例电力电子设备为电力信息物理系统韧性提升策略提供关键的数据支撑, 高精度状态感知技术的普及保障策略评估的实时性和有效性, 但大量信息节点与物理节点频繁信息交互增加系统面临的风险, 连锁故障、级联失效带来的威胁不容忽视, 如何根据电力电子设备结构制定统一的安全标准及保护措施, 减轻业务中心应对极端事件时的预防和维修压力, 是系统韧性提升的基础问题。

2) 具有高带宽、大容量、低延时等优势通信技术拓展电力信息物理系统的应用需要, 交互、融合构成不同类型的信息网络能有效避免通信延迟、中断等情况, 但繁多的通信协议和复杂的信息格式不利于业务中心准确判断设备的状态。当系统遭遇各种随机事情时, 业务中心无法及时、有效地区分具体类型随机事件发生时相应设备终端的工作情况, 如何建立通信技术在不同条件下相关特征参数的数学模型, 保证通信传输的独立性, 是系统韧性提升的关键问题。

3) 高比例新能源发电逐步取代传统发电机组, 不同能源的融合产生更大的韧性冗余空间, 强化电力信息物理系统与用电用户的双向互动, 但也出现新能源机组出力随机性、节点注入功率不确定性、线路潮流波动频繁等问题, 业务中心因此无法精准评估拟采取策略的真实效果, 造成实际应用时韧性提升效果有限, 如何根据新能源机组在信息网络与物理网络的耦合过程中扮演的角色建立科学、合理的联合仿真模型或方法, 量化新能源机组的作用机理和表现形式, 是系统韧性提升的重要问题。

4) 针对不同类型极端事件, 电力信息物理系统通过采取各种预防、抵御、恢复措施保障电网安全稳定运行, 但激增的通信传输、数据分析、决策处理等需求对业务中心计算能力提出更高的要求, 例

如如何高效、快速、自动部署应急资源并通过临时建立的应急控制平台实现设备资源、通信资源、数据资源、存储资源的协同和共享。因此, 电力信息物理系统的各种韧性提升策略如何利用云计算、大数据、强化学习、深度学习等在数学分析方面的优势, 真正实现电力信息物理系统智能动作和优化控制, 将是系统韧性提升面临的挑战。

参考文献

- [1] 盛成玉, 高海翔, 陈颖, 等. 信息物理电力系统耦合网络仿真综述及展望[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 100-105.
SHENG Chengyu, GAO Haixiang, CHEN Ying, et al. Summary and prospect of cyber physical power system simulation[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 100-105.
- [2] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力 CPS 的架构及其实现技术与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 1-7.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 1-7.
- [3] 刘东, 盛万兴, 王云, 等. 电网信息物理系统的关键技术及其进展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3522-3531.
LIU Dong, SHENG Wanxing, WANG Yun, et al. Key technologies and trends of cyber physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3522-3531.
- [4] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [5] U.S. Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14th blackout in the United States and Canada: causes and recommendations[R]. 2004.
- [6] TIAN M, DONG Z C, GONG L, et al. Coordinated repair crew dispatch problem for cyber-physical distribution system[J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid: 1-12 [2022-12-15]. DOI: 10.1109/TSG.2022.3209533.
- [7] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021 年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 121-128.
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and

- Control, 2021, 49(9): 121-128.
- [8] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2744.
- BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2744.
- [9] 薛禹胜, 吴勇军, 谢云云, 等. 停电防御框架向自然灾害预警的拓展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 18-26.
- XUE Yusheng, WU Yongjun, XIE Yunyun, et al. Extension of blackout defense scheme to natural disasters early warning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 18-26.
- [10] 别朝红, 林雁翎, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 1-9.
- BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
- [11] KOBAYASHI Y. Enhancing energy resilience: challenging tasks for Japan's energy policy[R]. Washington D. C.: Center for Strategic and International Studies, 2014.
- [12] European Commission. A framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy[R]. Brussels: European Commission, 2015.
- [13] LEE J, BAGHERI B, KAO H A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems[J]. Manufacturing Letters, 2015, 3: 18-23.
- [14] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [15] VUGRIN E D, TURNQUIST M A, BROWN N J K. Optimal recovery sequencing for enhanced resilience and service restoration in transportation networks[J]. International Journal of System of Systems Engineering, 2014, 34(10): 218-246.
- [16] 陈磊, 邓欣怡, 陈红坤, 等. 电力系统韧性评估与提升研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 11-24.
- CHEN Lei, DENG Xinyi, CHEN Hongkun, et al. Review of the assessment and improvement of power system resilience[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 11-24.
- [17] PANTELI M, MANCARELLA P. The grid: stronger, bigger, smarter: presenting a conceptual framework of power system resilience[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3): 58-66.
- [18] MAEDEH M, MOHSEN P M, PAYAM T B, et al. A review of the measures to enhance power systems resilience[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 4059-4070.
- [19] 王泽斌, 王松岩, 陈莹, 等. 强台风环境下考虑微地形因素的输电通道结构安全概率评估方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 184-191.
- WANG Zebin, WANG Songyan, CHEN Ying, et al. Safety probability assessment method considering micro-topography for transmission grid under strong typhoon environment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 184-191.
- [20] 张恒旭, 刘玉田. 极端冰雪灾害对电力系统运行影响的综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 52-58.
- ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Comprehensive assessment of extreme ice disaster affecting power system operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 52-58.
- [21] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思: (二)任务与展望[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 1-5.
- XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: part two tasks and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 1-5.
- [22] 张保会, 刘海涛, 陈长德. 电话、电脑、电视和电力网“四网合一”的概念与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 60-65.
- ZHANG Baohui, LIU Haitao, CHEN Changde. Concept and key techniques of using power transmission lines as common platform for telephone, computer, television and power transmission networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 60-65.
- [23] 汤奕, 陈倩, 李梦雅, 等. 电力信息物理融合系统环境中的网络攻击研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 59-70.
- TANG Yi, CHEN Qian, LI Mengya, et al. Overview on cyber-attacks against cyber physical power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 59-70.
- [24] 王琦, 李梦雅, 汤奕, 等. 电力信息物理系统网络攻击与防御研究综述(一)建模与评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 9-22.
- WANG Qi, LI Mengya, TANG Yi, et al. A review on research of cyber-attacks and defence in cyber physical power systems part one modelling and evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems 2019, 43(9): 9-22.

- [25] 汤奕, 李梦雅, 王琦, 等. 电力信息物理系统网络攻击与防御研究综述(二)检测与保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 1-11.
TANG Yi, LI Mengya, WANG Qi, et al. A review on research of cyber-attacks and defense in cyber physical power systems part two detection and protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 1-11.
- [26] 王琦, 郜伟, 汤奕, 等. 面向电力信息物理系统的虚假数据注入攻击研究综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(1): 72-84.
WANG Qi, TAI Wei, TANG Yi, et al. A review on false data injection attack toward cyber-physical power system[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 72-84.
- [27] 朱炳铨, 郭逸豪, 郭创新, 等. 信息失效威胁下的电力信息物理系统安全评估与防御研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 178-188.
ZHU Bingquan, GUO Yihao, GUO Chuangxin, et al. A survey of the security assessment and security defense of a cyber physical power system under cyber failure threat[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 178-188.
- [28] 张勇军, 刘斯亮, 江金群, 等. 低压智能配电网技术研究综述[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 1-12.
ZHANG Yongjun, LIU Siliang, JIANG Jinqun, et al. Research review on low-voltage intelligent distribution network technology[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 1-12.
- [29] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric internet of things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [30] 王健健, 李永倩. 分布式光纤传感技术在 OPGW 监测中的应用现状[J]. 光通信研究, 2018(3): 25-27.
WANG Jianjian, LI Yongqian. Progress on distributed optical fiber sensing technology in OPGW monitoring[J]. Study on Optical Communications, 2018(3): 25-27.
- [31] PARSHANI R, BULDYREV S V, HAVLIN S. Interdependent networks: reducing the coupling strength leads to a change from a first to second order percolation transition[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(4): 048701.
- [32] BULDYREV S V, SHERE N W, CWILICH G A. Interdependent networks with identical degrees of mutually dependent nodes[J]. Physical Review E, 2011, 83(1).
- [33] WATANABE S, KABASHIMA Y. Cavity-based robustness analysis of interdependent networks: influences of intra network and internetwork degree-degree correlations[J]. Physical Review E, 2014, 89(1).
- [34] YAN O, QIAN D J, ZHANG J S, et al. Optimal allocation of interconnecting links in cyber-physical systems: interdependence, cascading failures, and robustness[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(9): 1708-1720.
- [35] SHAO J, BULDYREV S V, HAVLIN S, et al. Cascade of failures in coupled network systems with multiple support-dependence relations[J]. Physical Review E, 2011, 83(3).
- [36] ZHANG L M, LI D Q, QIN P J, et al. Reliability analysis of interdependent lattices[J]. Physica A, 2016, 452: 120-125.
- [37] LI W, BASHAN A, BULDYREV S V, et al. Cascading failures in interdependent lattice networks: the critical role of the length of dependency links[J]. Physical Review Letters, 2012, 108(22).
- [38] BAIDYA P M, SUN W. Effective restoration strategies of interdependent power system and communication network[J]. The Journal of Engineering, 2017(13): 1760.
- [39] ROSATO V, ISSACHAROFF L, TIRITICCO F, et al. Modelling interdependent infrastructures using interacting dynamical models[J]. International Journal of Critical Infrastructures, 2008, 4(12): 63.
- [40] 韩小涛, 聂一雄, 尹项根. 基于 OPNET 的变电站二次回路通信系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 67-71.
HAN Xiaotao, NIE Yixiong, YIN Xianggen. Research on substation secondary circuit communication system using OPNET simulator[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 67-71.
- [41] 刘雨佳, 樊艳芳. 计及 5G 基站储能和技术节能措施的虚拟电厂调度优化策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(1): 8-15.
LIU Yujia, FAN Yanfang. Optimal scheduling strategy for virtual power plant considering 5G base station technology, energy-storage, and energy-saving measures[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(1): 8-15.
- [42] 曾博, 穆宏伟, 董厚琦, 等. 考虑 5G 基站低碳赋能的主动配电网优化运行[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(3): 279-292.
ZENG Bo, MU Hongwei, DONG Houqi, et al. Optimization of active distribution network operation considering decarbonization endowment from 5G base stations[J].

- Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(3): 279-292.
- [43] 米阳, 李战强, 刘红业, 等. 考虑通信故障的直流微电网多储能荷电状态动态均衡策略[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3282-3291.
- MI Yang, LI Zhanqiang, LIU Hongye, et al. State-of-charge dynamic balancing strategy for multi energy storage of DC micro-grid considering communication faults[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3282-3291.
- [44] 刘文霞, 马铁, 杨梦瑶, 等. 严重通信故障下主动配电系统分布式电源应急运行策略优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3):754-767.
- LIU Wenxia, MA Tie, YANG Mengyao, et al. Contingency optimization strategy for distributed generations of active distribution network under serious communication failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 754-767.
- [45] 杨晓东, 张有兵, 赵波, 等. 考虑规划需求的 EV 充电桩集群管理系统通信方式综合评价[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 10-20.
- YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, ZHAO Bo, et al. Planning demands considered comprehensive evaluation method of communication for EV charging piles management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 10-20.
- [46] 王靖瑶, 郑华青, 郭景华, 等. 通信延迟下智能电动汽车队列分布式自适应鲁棒控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(9): 889-897.
- WANG Jingyao, ZHENG Huaqing, GUO Jinghua, et al. Distributed adaptive robust platoon control of intelligent electric vehicles with communication delays[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2021, 61(9): 889-897.
- [47] 戴栋, 张敏, 赵东生, 等. 输电线路在线监测装置研制及其通信组网应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 3902-3907.
- DAI Dong, ZHANG Min, ZHAO Dongsheng, et al. On-line monitoring device for transmission lines and its communication network application[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3902-3907.
- [48] 黄天聪, 邓礼力, 薛武, 等. 输变电设备物联网通信网络结构及拓扑分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 3922-3928.
- HUANG Tiancong, DENG Lili, XUE Wu, et al. Communication network structure and topology analysis of internet of things for power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3922-3928.
- [49] 杨秋霞, 袁冬梅, 郭小强, 等. CPS 概念下基于事件触发且考虑通信丢包及扰动的微网分层控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3209-3222.
- YANG Qiuxia, YUAN Dongmei, GUO Xiaoqiang, et al. An event-triggered hierarchical control strategy based on concept of CPS for micro-grid considering with packet loss and communication disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3209-3222.
- [50] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
- LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [51] 张文远, 李天昊. 电力线传输特性和噪声干扰对通信性能的相对影响[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 145-153.
- ZHANG Wenyuan, LI Tianhao. Relative impacts of channel characteristics and noise characteristics on the performance of a power line communication system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 145-153.
- [52] 刘涤尘, 冀星沛, 陈果, 等. 基于复杂网络理论的电力通信网加边保护策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 121-127.
- LIU Dichen, JI Xingpei, CHEN Guo, et al. Link addition strategy based on complex network theory for power communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 121-127.
- [53] 金鑫, 肖勇, 曾勇刚, 等. 低压电力线宽带载波通信信道建模及误差补偿[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2800-2809.
- JIN Xin, XIAO Yong, ZENG Yonggang, et al. Modeling and error compensation for low-voltage broadband power line communications[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2800-2809.
- [54] 王东, 王艳, 焦彦军, 等. 基于局部反射理论的中压配电网电力线通信信道建模法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 178-184.
- WANG Dong, WANG Yan, JIAO Yanjun, et al. Channel modeling method of power line communication for medium voltage distribution network based on partial reflection theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 178-184.
- [55] 刘保菊, 喻鹏, 丰雷, 等. 电力 SDN 通信网中面向负载均衡的路由重构[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(2): 16-23.
- LIU Baoju, YU Peng, FENG Lei, et al. Rerouting algorithm for load balancing in SDN-Enabled smart grid communication network[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(2): 16-23.

- [56] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 77-83.
ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
- [57] 付灿宇, 王立志, 齐冬莲, 等. 有源配电网信息物理系统混合仿真平台设计方法及其算例实现[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7118-7125.
FU Canyu, WANG Lizhi, QI Donglian, et al. Design and experiments of active distribution network CPS simulation platform[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7118-7125.
- [58] 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(6): 1706-1720.
LIU Wenxia, GONG Qi, GUO Jing, et al. Reliability simulation of ADN cyber-physical system based on hybrid communication network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1706-1720.
- [59] 王子欣, 苗世洪, 郭舒毓, 等. 基于复杂系统理论的电力通信耦合网络模型构建及节点重要度评估方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 84-94.
WANG Zixin, MIAO Shihong, GUO Shuyu, et al. Construction of power communication coupling network model and node importance evaluation method based on complex system theory[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 84-94.
- [60] 汤奕, 韩啸, 吴英俊, 等. 考虑通信系统影响的电力系统综合脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6066-6074.
TANG Yi, HAN Xiao, WU Yingjun, et al. Electric power system vulnerability assessment considering the influence of communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6066-6074.
- [61] 刘涤尘, 冀星沛, 王波, 等. 基于复杂网络理论的电力通信网拓扑脆弱性分析及对策[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3615-3622.
LIU Dichen, JI Xingpei, WANG Bo, et al. Topological vulnerability analysis and countermeasures of electrical communication network based on complex network theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3615-3622.
- [62] 刘雯静, 郭静波. 面向双向互动需求的高速窄带电力线通信组网与路由机制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 8-17.
LIU Wenjing, GUO Jingbo. Networking and routing of high-speed narrowband power line communications for bidirectional interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 8-17.
- [63] 蒋玮, 汪梁, 王晓东, 等. 面向用电双向互动服务的信息通信模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 7-14.
JIANG Wei, WANG Liang, WANG Xiaodong, et al. An information communication model for two-way interactive service of power utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 7-14.
- [64] 崔力民, 孙静月, 李珊君, 等. 一种基于熵的电力通信网络业务资源均匀分配算法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3066-3072.
CUI Limin, SUN Jingyue, LI Shanjun, et al. An algorithm for business resource uniform distribution in power communication network based on entropy[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 3066-3072.
- [65] 陆俊, 李子, 朱炎平, 等. 智能配用电信息采集业务通信带宽预测[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1277-1283.
LU Jun, LI Zi, ZHU Yanping, et al. Communication bandwidth prediction for information gathering services in power distribution and utilization of smart grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1277-1283.
- [66] 王梓博, 穆云飞, 王宇飞, 等. 考虑多代理供电恢复系统通信失效的配电网 CPS 风险评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 51-59.
WANG Zibo, MU Yunfei, WANG Yufei, et al. Cyber physical system risk assessment of distribution network considering communication failure of multi-agent system for power restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 51-59.
- [67] 徐岩, 张荟, 孙易洲. 基于变异粒子群算法的主动配电网故障恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 45-53.
XU Yan, ZHANG Hui, SUN Yizhou. Fault recovery strategy of active distribution network based on mutation particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 45-53.
- [68] 姜爱华, 韦化. 基于通信的大规模空调与电网互动的分布式合作模型及优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6276-6283.
JIANG Aihua, WEI Hua. Distributed cooperation model and optimal control strategy for interaction between large-scale air conditioning and power grid based on communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6276-6283.
- [69] 张占强, 窦春霞, 岳东, 等. 考虑通信时延的事件触发电压分布式协同控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5426-5425.
ZHANG Zhanqiang, DOU Chunxia, YUE Dong, et al.

- Event-triggered voltage distributed cooperative control with communication delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5426-5425.
- [70] MASE K. How to deliver your message from/to a disaster area[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(1): 52-57.
- [71] 谭诗翰, 金凤林, 顿聪颖. 面向用户需求的空天地一体化车载网络任务分配策略[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(5): 1717-1728.
- TAN Shihan, JIN Fenglin, DUN Congying. Task assignment strategy for space-air-ground integration vehicular networks oriented to user demand[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(5): 1717-1728.
- [72] 彭向阳, 王柯, 肖祥, 等. 大型无人直升机电力线路智能巡检宽带卫星通信系统[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 368-376.
- PENG Xiangyang, WANG Ke, XIAO Xiang, et al. Broadband satellite communication system in the intelligent inspection of electric power line base on large scale unmanned helicopter[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 368-376.
- [73] CHITI F, FANTACCI R. A broadband wireless communications system for emergency management[J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 7(6): 8-14.
- [74] ANSARI N, ZHANG C. Networking for critical conditions[J]. IEEE Wireless Communications, 2008, 7(4): 73-81.
- [75] SILVER D, HUBERT T. A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and go through self-play[J]. Science, 2018, 62(6419): 1140-1144.
- [76] SHARMA V, BENNIS M, KUMAR R. UAV assisted heterogeneous networks for capacity enhancement[J]. IEEE Communication Letters, 2016, 20(6).
- [77] ALI K, NGUYEN H X, VIEN Q T, et al. Deployment of drone based small cells for public safety communication system[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(2): 2882.
- [78] ARAFAT M Y, MOH S. Localization and clustering based on swarm intelligence in UAV networks for emergency communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 8958-8976.
- [79] ALEX C, VIJAYCHANDRAA. Autonomous cloud-based drone system for disaster response and mitigation[C] // 2016 International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications (RAHA), December 18-20, 2016, Amrita, India: 183-186.
- [80] MEZGHANI F, KORTOCI P, MITTONN, et al. A multitier communication scheme for drone assisted disaster recovery scenarios[C] // 2019 IEEE 30th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), September 8-11, 2019, Istanbul, Turkey: 240-246.
- [81] ZHANG S H, ZHANG H L, HAN Z, et al. Age of information in a cellular internet of UAVs: sensing and communication trade-off design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(10): 6578-6592.
- [82] ZHAO Y, LI Z, CHENG N, et al. Joint UAV position and power optimization for accurate regional localization in space-air integrated localization network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(6): 4841-4854.

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2023-02-17

作者简介:

龚立(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统韧性策略; E-mail: ligong@whu.edu.cn

王先培(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为实时系统可靠性、电力系统故障诊断; E-mail: xpwang@whu.edu.cn

田猛(1989—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为电力系统安全与可靠性、电力系统自动化。E-mail: mengtian@whu.edu.cn

(编辑 魏小丽)