“互联网+”形势下电力信息物理融合发展研究综述与展望

王东芳[1],刘水源[1],张勇军[2],宋旭东[3],林晓明[2],陈家超[2]
(1. 广东电网有限责任公司河源供电局,广东 河源 517000;
2. 华南理工大学 电力学院 智慧能源工程技术研究中心,广东 广州 510640;
3. 广东电科院能源技术有限责任公司,广东 广州 510080)

摘要:能源技术的变革催生了电力系统技术的发展,“互联网+”技术的创新应用加强了电力系统信息-物理之间的联系。在对比电力系统信息化建设进程的基础上,深入阐述了其核心特征——信息物理融合的本质。进而,基于信息物理融合系统(CPS)的研究范畴,从数值仿真和机理解析2个维度,总结综述了电力CPS在信息物理融合的建模分析及相互影响方面的研究进展,并提出了在“互联网+”技术融合创新下电力CPS相关技术的研究挑战。最后,展望了“互联网+”形势下一二次融合、芯片传感、透明网络、区块链等电力系统信息物理融合关键技术的发展趋势。

关键词:“互联网+”;信息物理融合系统;电力系统;一二次融合;透明网络
中图分类号:TM 73　　**文献标志码**:A　　DOI:10.16081/j.epae.202005033

0 引言

由于资源、环境等多重压力,能源系统转型升级已成为能源革命的迫切任务需求[1-2]。作为能源生产、传输、消费的重要组成部分,电力系统正朝着智能化、信息化转型,以适应清洁、高效能源的生产和消费需要[3-5]。

早在21世纪初,美国、欧盟及中国相继提出建设智能电网SG(Smart Grid)以及“自愈、兼容、优化、互动、集成”等SG的特征[6-7],其关键在于接受大量的信息并迅速进行智能化响应,以应对高渗透率可再生能源接入电网和提升客户服务能力的需求。自从SG的概念被提出,信息技术在电力系统中的应用逐渐受到重视。近年来,互联网思维和互联网技术正不断渗透传统行业,希望利用互联网等信息技术为传统能源行业带来新的革命,促进能源利用的高效清洁化[8-10]。能源互联网、“互联网+”智慧能源、数字电网、电力物联网、泛能网等概念的提出,均为了加速“互联网+”技术在能源行业中的创新应用,推进信息系统与物理系统的融合[11-12]。

在信息物理融合发展背景下,针对传统重视物理系统本身(电力系统)的研究已有局限性。2015年底,乌克兰电网的能源管理系统(EMS)因遭受黑客攻击而失效,造成涉及约8万个用户的大规模停电事故,这是首例由网络攻击造成的停电事故[13],从而掀起了研究电力系统的信息物理融合相互作用影响的高潮[14-16]。该研究主要借助信息物理融合系统CPS(Cyber-Physical System)的基本研究理论,探索CPS在电力系统建模、分析、控制、形式化验证等[17-19]方面的应用,核心是建立信息系统与物理系统相互依存影响的建模仿真分析理论。

当前,信息系统与物理系统的联系愈加紧密,针对电力系统中的信息物理融合研究方兴未艾。而在“互联网+”技术的加速推动下,信息的广泛获取与互联网的互联互通、万众参与特性使得电力信息物理融合系统CPPS(Cyber-Physical Power System)技术研究面临系统规模增大、安全风险增加等挑战。

基于此,本文从电力系统信息化建设进程角度切入,分析“互联网+”形势下CPPS的新特性。进一步总结综述了CPPS在建模分析和相互影响方面的研究进展,并提出了“互联网+”形势下CPPS分析研究所面临的挑战,最后对“互联网+”形势下CPPS的关键技术进行展望。

1 “互联网+”形势下电力信息物理融合

在工业控制领域,信息与物理相互融合构成的系统被统称为CPS,CPS已经广泛应用于自动化领域,成为支撑信息化与工业化的关键。CPS紧密结合计算(Computer)、通信(Communication)与控制(Control)3类技术(即3C技术),构建了物理系统与信息系统相互映射、适时交互与高效协同的复杂二元系统[20-21]。

SG作为早期电网信息化进程提及的概念,提出了信息化建设,但从概念上还是更加强调物理域坚强大电网的建设,以坚强的物理网架,配合通信技术的提升,建设坚强SG[22-24]。SG可视为是电力系统领域信息物理融合(即CPPS)的雏形。相比于SG,

收稿日期:2019-11-27;**修回日期**:2020-03-30
基金项目:广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM2017-2775);广东省自然科学基金资助项目(2017A030313304)
Project supported by the Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co.,Ltd.(GDKJXM20172775) and Guangdong Natural Science Foundation(2017A030313304)

CPPS的研究范畴着重于在融合过程中物理域和信息域处于平等地位，侧重物理域与信息域的交互融合及其对整个CPPS稳定运行的影响[25-26]。

典型的CPPS架构如图1所示。其中电力系统包括发电设备、输配电网络和用户，这些物理设备通过电力线路相互连接；信息系统包括调度控制中心、子控制系统、数据采集和命令执行设备，这些信息设备通过通信网络相互连接，通信网络包括有线网络和无线网络。通过"智能感知-实时分析-科学决策-精准执行"的闭环过程，将能量流分布显示化，实现开关、变压器、电源和负荷等电力设备的运行状态监测，在此基础上进行计算分析和科学优化，从而实现整个电力系统的智能化控制。

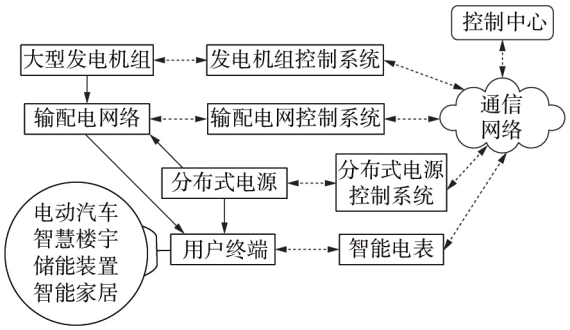

图1　CPPS的典型架构

Fig.1　Typical structure of CPPS

随着物联网、5G、人工智能等信息技术的发展及信息化程度的加深，电力系统信息化技术亦进一步受到重视。以能源互联网、"互联网+"智慧能源作为电力系统信息化进程的另一焦点，需重点关注如何利用"云大物移智"等互联网技术实现电力系统各环节的互联互通，使电力系统具有状态全面感知、高效处理信息、应用便捷灵活的特性[11,27]。

相比于SG这一CPPS的雏形，"互联网+"技术推动下电力系统的信息物理融合特性更加明显。一方面，更加重视信息技术在CPPS中的作用，通过对电力系统数据资源的分析和挖掘，大力发展基于电力大数据、云计算等互联网创新业务，最终提升电网的运营水平；另一方面，基于互联网的万众参与理念，在传统的只强调信息系统与物理系统（物-物交互）的基础上还增加考虑了人机交互（物-人交互）的元素。

因此，"互联网+"发展形势下，电力系统能量流和信息流的融合程度加深，突出特性表现为以下3个方面。

（1）信息物理融合涉及的装备层面更广。在物理层面，分布式电源、电动汽车等设备将大量广泛接入实现万众参与；而智能传感、一二次融合设备海量增多，信息获取更加泛在。

（2）多变运行方式加大了信息处理的负担。一次系统（物理侧）因具有泛在物理设备接入而使运行方式多变，系统安全问题更加突出。为了保证物理侧的安全运行，系统传感-传输-处理的信息增加，海量数据响应反馈激增了信息侧运行的压力。

（3）电网运行安全风险加大。"互联网+"技术所带来的信息传输方式多样、范围更广，用户基于信息互联互通广泛参与物理系统的决策，电网面临更具广泛的信息物理安全防范风险。

2　CPPS分析研究进展

对于电力系统的信息物理融合，研究重点集中于2个系统之间的交互建模和影响分析。现有研究大多从2个角度出发：一是数值仿真分析[28-34]，其主要以还原论的思路，搭建CPPS的仿真模型，力求最大限度地还原实际CPPS中电力系统与其信息系统之间的交互影响；二是理论建模机理解析[35-41]，主要基于复杂网络理论建模，以拓扑结构理论侧重分析CPPS的安全稳定问题。

数值仿真分析的优势在于通过复杂动态模型的时间离散化，以可视化的形式明晰信息与物理2个系统之间的影响过程，但对于内在机理解析、演化趋势分析尚欠缺，主要适用于故障事故回放、预想事故集分析等。而理论建模机理解析利用复杂网络理论，抓住问题的本质构建了CPPS的信息物理数学模型，通过数学推导更加明晰信息物理的内部演化机理，可更好地制定安全防范策略。但为了更好地进行理论推导，数学上往往做了简化和近似，主要可用于机理的解析与系统演化趋势的预判。数值仿真分析与理论建模机理解析两者相辅相成，能更好地服务于CPPS的分析研究。

几类CPPS数值仿真分析方法和基于理论建模的CPPS互作用下的安全分析阐述如下。

2.1　CPPS联合数值仿真分析

电力网络与信息网络之间存在异构性，开发适用于CPPS的统一仿真平台在短期内难以实现，故构建电力-信息网络的联合仿真成为当前的研究热点[42-43]。CPPS联合仿真基于已有的电力系统仿真软件和信息网络仿真软件，通过构建二者交互的接口，实现对实际CPPS的仿真模拟。常见的电力系统仿真软件有实时数字仿真（RTDS）[44]、eMEGAsim仿真器[45]和HYPERSIM[46]仿真机等，常见的信息网络仿真软件有商业软件（如OPNET[47]、COMNET[48]和BONes等）和开源软件（如NS2[49]、SSFNet[50]和GloMoSim[51]等），电力系统/信息网络采用不同的仿真软件，可以形成多种CPPS联合仿真平台构建方案。同时，电力系统仿真软件与信息网络仿真软件的数据交互和时间同步也存在多种不同的实现方法。

根据仿真平台构建方式、数据交互和时间同步

方法的不同，可将CPPS联合仿真方法划分为扩展信息物理系统仿真、非实时混合仿真和实时混合仿真。

扩展信息物理系统仿真忽略了系统的动态特性，加快了系统的仿真速度，但由于对模型进行了简化，较适用于长时间稳态分析。非实时混合仿真和实时混合仿真主要用于短时间尺度内的动态仿真，区别在于非实时混合仿真采用数学方法在仿真时间同步上进行修正，而实时混合仿真采用实时仿真单元并以实时仿真的形式避免时间同步问题，这同时也提高了实时混合仿真对系统可靠性的要求。针对不同问题对仿真时间尺度的要求，可选择不同的联合仿真平台。

(1)扩展信息物理系统仿真。

扩展信息物理系统仿真是在物理系统仿真平台上嵌入信息系统模型或者在信息系统仿真平台上嵌入物理系统模型。文献[28]将电力系统模型集成为MATLAB模块，通过合适的接口，将电力模型以及INET信息仿真模型接入OMNET++仿真环境。文献[29]通过构建动态链接库，对物理模型和信息模型进行桥接，实现了物理-信息模型的相互对应。拓展信息物理系统的建模需要对信息物理系统进行简化建模，牺牲了信息物理系统的动态特性，避免了数据交互和时间同步的问题，较适用于CPPS长时间尺度的稳态特性分析。

(2)非实时混合仿真。

非实时混合仿真是电力和信息网络均在各自专业的仿真平台上进行建模，并通过软件接口实现数据交互和时间同步[30-31]。目前单一的电力或者信息系统的仿真软件技术已经相对成熟，对电力及信息系统均采用专业的仿真软件，能够保留系统的动态特性且更全面准确地还原实际系统。但该方法软件接口的实现较为复杂，同时仿真时长也限制了该方法的应用。

为了解决非实时混合仿真系统在时间同步上的缺陷，已有不少方法进行了数据同步的修正[31-32]，实现数据交互和时间同步的方法可以分为基于同一时间轴同步和基于同一事件轴同步2种。

非实时混合仿真的时间同步方法如图2所示。基于同一时间轴同步的电力系统与信息系统的仿真采用完全同步的时序逻辑进行仿真分析，2个系统之间可以随时进行数据交互。但是由于软件接口存在数据处理、数据传输等方面的时间延迟，2个系统难以实现时序的精确同步。而基于同一事件轴同步的电力系统与信息系统仿真采用相同的事件序列实现同步联合仿真，在仿真相同事件时，2个系统进行数据交互。该同步方法下，系统的仿真时间无需同步。但是当2个系统的仿真速度相差较大时，整个CPPS系统的联合仿真速度取决于仿真速度慢的系统，这将大幅降低整个系统的仿真速度。

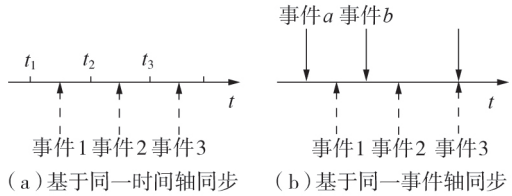

图2 非实时混合仿真的时间同步方法

Fig.2 Time synchronization method of non-real-time hybrid simulation

(3)实时混合仿真。

实时混合仿真在仿真平台构建方式上与非实时混合仿真相同。但是区别于非实时混合仿真系统的构建方式，实时混合仿真中电力和信息网络均采用实时仿真单元，并通过实时数据交换形成时间域上的天然同步[33-34]。

常用的电力系统实时仿真工具包括RTDS[44]、HYPERSIM[46]和OPAI-RT[52]。通信系统的实时仿真工具主要有OPNET[47]。实时混合仿真中，实时通信软件需提供与其他在线软硬件模块的网关或接口，在仿真中与其他实时仿真系统进行实时数据交互。

2.2 CPPS机理建模与互作用安全分析

基于联合数值仿真分析可模拟信息、物理2个网络之间的相互影响过程。为了进一步挖掘CPPS物理与信息系统之间的互作用影响机理，明晰演化趋势，需进行深入的电力-信息互作用安全性机理分析。

2.2.1 电力-信息耦合机理建模

电力-信息耦合机理建模是互作用安全分析的基础，机理建模基于复杂网络理论将单一的系统抽象为一个由节点和边构成的网络，将CPPS描述为电力系统和信息网络的相互依存网络，简称相依网络。

电力网络和信息网络存在2种依靠关系：一方面，信息节点负责对电力节点进行信息采集、数据监测和实施控制(3C功能依靠关系)；另一方面，电力节点为信息节点提供电能供应，保障信息节点的正常工作(能量依靠关系)。不同的CPPS根据电力网络与信息网络之间依靠关系的不同，存在不同的耦合方式。常见的电力网络-信息网络的耦合方式有一对一、一对多和多对多。

此外，相依网络中存在2种类型的边：连接边和依存边。连接边描述单侧网络中节点的连接关系，如电力网络中的电力线路、信息网路中的通信线路；依存边描述电力节点与信息节点的3C功能依存关系或能量依存关系[17,35-36]。电力网络-信息网络的耦合方式如图3所示。

基于复杂网络理论，电力-信息相依网络的建模过程如下：首先根据电力、信息网络的拓扑结构，将

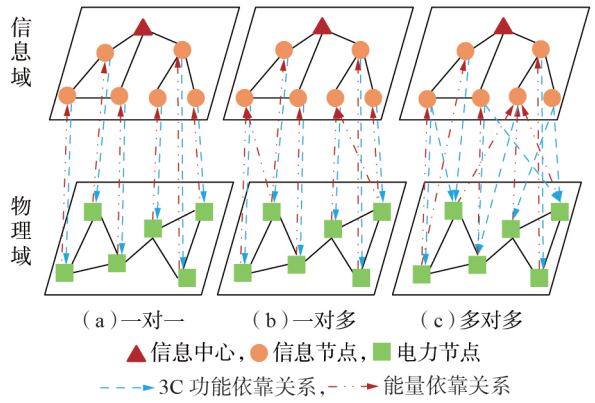

图 3　电力网络–信息网络的耦合方式

Fig.3　Coupling mode of electric power network and information network

其分别描述为一个无权无向图 G_p（电力网络）和 G_c（信息网络）。对于每一个网络 $G=\{G_p, G_c\}$，可将其描述为节点和边的集合，即 $G=(V, E)$，其中 V 和 E 分别为网络的节点集合和连接边集合。

进一步地，根据电力节点与信息节点的依存关系建立相依网络依存边集合 $E_D=\{\boldsymbol{E}_{C-P}, \boldsymbol{E}_{P-C}\}$。其中 $\boldsymbol{E}_{C-P}$ 为信息网络依存于电力网络的依存边矩阵，若 $E_{C-P}(x, y)=1$，则表示信息节点 $V(x)$ 与电力节点 $V(y)$ 存在能量依存关系；若 $E_{C-P}(x, y)=0$，则表示信息节点 $V(x)$ 与电力节点 $V(y)$ 不存在能量依存关系。同理，可以获得电力网络依存于信息网络的依存边矩阵 $\boldsymbol{E}_{P-C}$。

综上，电力–信息耦合的相依网络可由包含电力网络、信息网络及二者依存关系的集合 $\varphi(G_p, G_c, E_D)$ 进行统一描述。

2.2.2　互作用安全性分析

CPPS 互作用安全性分析主要基于耦合相依网络模型，分析电力网络与信息网络之间的故障传播机理，进而对系统安全性进行分析。随着电力信息物理融合程度的加深，当电力–信息相依网络中的某个节点发生故障时，通过相依网络的交互影响可使故障加以扩散传播，引发系统连锁故障，造成大规模停电。现有研究大多关注单一网络（信息网或者物理网）发生故障的安全风险，对 CPPS 中电力网与信息网之间的故障传播及其带来的安全风险研究仍处于起步阶段。

文献[37]构建了基于细胞自动机的 CPPS 安全风险传播模型，重点研究了信息系统故障对电力系统的影响。文献[38]考虑了通信延时、数据错位与数据差别的预想事故，构建了 CPPS 的动态交互模型。文献[39]开展了基于虚拟发电厂的配电网 CPPS 的风险评估研究，虚拟发电厂采用分布式协同控制策略，在此基础上，提出配电网 CPPS 风险评估框架，构建了动态攻防博弈模型，设计网络攻击者的攻击资源分配与电网防御者防御资源分配的动态博弈，并评估系统损失的期望。文献[40]建立了电力–通信耦合网络模型，考虑攻击者获取信息的多寡，将信息攻击方式分为随机攻击、拓扑攻击以及灵活攻击，通过连锁故障仿真流程，研究电力–通信耦合网络的脆弱性。文献[41]类比电力系统安全事故集，提出了 CPPS 的信息物理安全分析架构。

上述基于 2 个系统相互耦合的安全机理分析，能较好地揭示 2 个系统之间的安全互作用特性，但在未来信息物理高度融合、节点规模增大的情况下，整体系统安全分析的效率、实时性还有待进一步提升。

3　“互联网+”形势下 CPPS 分析研究挑战

3.1　互联互通带来的系统规模增大

“互联网+”形势下，信息互联互通带来传感节点增多。面向海量异构数据的统一识别问题、实时仿真效率问题、在线复杂性建模问题等面临挑战。

在海量数据接入方面，除了在传统 CPPS 研究分析进行物理–信息节点的信息物理建模之外，还需重点关注海量信息接入的处理。在进行系统分析时，通过对接入冗余信息量的预处理，减轻系统的信息处理负担。并可通过模块化建模的思想[10]，即将一个区域的信息物理系统分层建模等值，构建分层分区的信息物理模型，从而降低整个大系统的信息处理负担并进行系统安全、建模等分析。

在海量信息处理与决策方面，除了以分布式降低系统规模外，还需进一步研究面向海量数据的数据快速分析以及决策技术，加强 CPPS 在系统规模激增情况下的计算能力以及决策能力。技术手段有诸如大数据、云计算、人工智能等新一代互联网技术。具体地，互联互通下海量数据的处理需建立关于能源数据的云资源平台，供区域内以及跨区域的相关资源的共享。该资源不仅包含计算资源，还包括数据资源、存储资源以及软件资源等。对于大数据技术，研究挑战在于传统计算理论在高性能要求和大数据环境下的技术革新、应用迁移以及效能提升。此外，如何利用深度学习、强化学习等人工智能技术在高维数据分类、拟合、降维、聚类等方面的优势，将知识赋予信息，使收集到的海量信息顺利辅助 CPPS 的优化决策，将是系统规模增加下 CPPS 分析研究的重要挑战。

3.2　万众参与引起的系统安全风险增加

随着“互联网+”技术的渗透与相应装备平台的普及，大量信息传感器、物理设备可在不区分时间与地点的情况下接入 CPPS 并进行信息交互。万众参与、互惠共享的“互联网+”形势下，因为物理–信息

节点的激增，系统面临的安全风险将增加。近年来，网络攻击造成的电力系统安全事件逐渐增多，如2011年伊朗布尔核电站遭受到网络攻击，直接导致核设施停运[53]；2015年乌克兰电网遭受恶意病毒攻击，造成大面积停电[13]；2019年委内瑞拉疑因网络攻击造成大面积停电[54]。电力系统网络安全事件的频繁发生给防范网络安全风险敲响了警钟，特别是在“互联网+”技术融合背景下，CPPS安全风险防范的进一步需求如下。

（1）接入安全标准制定。传感信息节点增加需从底层安全风险防范着手，自下而上保证系统安全。对接入系统网络的设备，制定安全准入原则，减轻大系统安全防范的压力。

（2）接入安全漏洞检测。对接入层的设备进行安全漏洞检查，以逐一设备的安全保证为抓手，从而保证海量设备接入后系统的安全性。

（3）提升安全保护技术。广域泛在的信息物理设备接入后，为了防范繁多设备的级联效应，需自主研发攻关安全防护技术，提升信息物理安全保障。

4 “互联网+”形势下CPPS关键技术展望

“互联网+”渗透CPPS的新形势下，CPPS的分析规模增大、安全风险增加。提升分析能力的关键技术，一方面在于从设备层着手，加强一次设备的信息物理融合能力，密切系统终端的信息联系；另一方面则在于整个信息传输处理过程的可观、可测及运转高效，以透明化的信息呈现能力及信息高效快速处理能力提升系统的安全预防及管控运维能力。

4.1 一二次设备融合技术

电气装备由一次设备和二次设备构成，用以实现CPPS中的感知、执行甚至分析、决策功能。随着SG的建设和物联网技术的成熟，一二次设备的融合也成为电气装备的发展趋势[55-57]。2016年，国家电网相继发布《配电设备一二次融合技术方案》、《一二次设备融合配电开关一体化检测方案》，用以加速一二次融合技术的标准化与集成化。

一二次融合设备的结构框架如图4所示，物理层包括断路器、负荷开关和隔离开关等各类小型化物理设备，信息层集成化状态监测、故障研判和同步控制等多种功能。

与传统设备相比，一二次融合设备具有以下显著的特征。

（1）标准化高：统一外观结构、标准化接口方式，各功能模块具有良好的兼容性、扩展性和互换性。

（2）功能完善：集成多种功能技术，如智能保护、电气监测、状态监测、供电质量监视、区域自治等。

（3）科学决策：支撑数据边缘计算，进行分层分级科学决策。

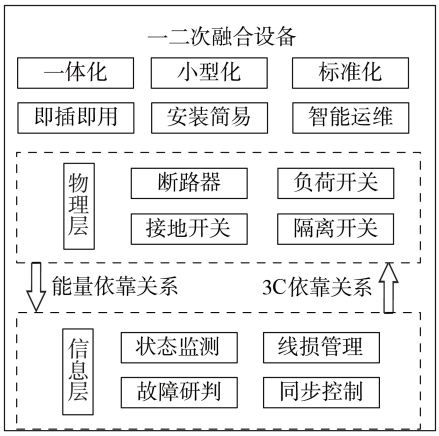

图4 一二次融合设备的结构框架

Fig.4 Structural framework of primary and secondary convergence devices

一二次融合的显著特征是功能的融合，对于一次配电开关而言，除了开关本体功能外，还可以将在线监测智能化模块嵌入本体，如操作机构机械性能监测、绝缘性能监测等功能[56,58]。设备的二次系统可将测量、控制、保护、防误闭锁、故障录波、通信、远动、信息处理等功能模块集成于一体。

一二次融合设备的发展解决了原有一二次设备接口不匹配、兼容性和拓展性差、接线复杂、运维困难等管理问题[56,59]。当前技术也存在着诸如一二次元件寿命不匹配、二次元件受强磁场干扰等问题。未来技术需进一步解决一二次融合设备安全、可靠、高效融合问题，可发展、可重点关注更加精细化的电子式互感器融合技术，包括互感器与一次设备组合、一二次融合和交互标准化设计。互感器和一次设备组合要考虑到一二次设备之间存在的电磁影响作用，确保其可靠性和小型化。标准化设计要对全部一次/二次接口、测量、控制信息交互统一化，实现设备的兼容性、易扩展性和互换性。

4.2 芯片传感技术

2015年5月国务院印发了《中国制造2025》，其中指出全面部署推进实施制造强国的战略，将“集成电路及专用装备”列为需要大力推动突破发展的重点领域之一[60]。随着集成电路技术的发展，芯片性能也得到了进一步提升，无论是主频、功耗还是制造工艺，都有了新的突破，芯片技术的广泛应用为信息传感的整体性能提升提供了必要基础。

芯片传感技术是传统传感设备的升级，主要是能源感知信息终端的芯片化处理[61]。通过芯片集成收集传感终端的信息，更小型化、低功耗、高可靠地获取能源系统终端各种物联设备的信息。当前芯片传感技术着眼于其关键传感材料技术的攻关：文献[62]研究了将磁通门和处理电路集成到芯片上，基于该芯片设计系统实现电流传感，从体积到功耗实

现了传感技术的提升；文献[63]则从传感手段入手，基于射频识别（RFID）温度传感芯片研究了基于无源无线传感技术的电力电缆测温装置，实现了芯片传感的多样化。2017年南方电网科学研究院在实验室成功测试了自主研发的芯片级直流电场传感器，推进了芯片传感器在电力系统中的工程应用。

目前，芯片化传感技术仍处于发展阶段。更完善的芯片传感架构、更高可靠低功耗的芯片材料仍是芯片传感技术面临的挑战。"互联网+"形势带来泛在设备的互联互通背景下，芯片传感技术除了具备收集终端多元异构数据、实现信息高效获取与传输的功能之外，还需开发芯片的计算功能，实现数据就地化保护及计算[64]。通过数据就地化预处理，减少与外部交换的数据量，进而减轻上级计算中心的计算负担。此举还可减少信息冗余量，使能源系统的信息处理能力更加高效。此外，还需进一步研究芯片化传感器的信息隐私保护功能，通过信息就地保存，交互少量关键信息，与其他系统进行信息交互。

4.3　CPS安全风险防御技术

"互联网+"形势下，CPPS的物理系统与信息系统深度融合，由于设备物联繁多泛在，CPS的安全风险加大。传统电网中，安全风险防范大多基于预想事故集给出故障处理规则库[65-66]，在泛在设备互联互通的复杂耦合网络状态下，规则库的适应性有限。因此，关于信息物理安全实时感知、安全性分析基础理论、安全运维管理等多方面需加强研究。

（1）信息物理安全实时感知的透明网络技术。

李立涅院士在2018盐城绿色智慧能源大会上提出了"透明电网"方向[67]，其核心思想是借助泛在网以及物联网技术的发展，打造设备状态透明、网络状态透明的信息物理网络。基于"透明电网"技术实现实时在线感知CPPS并进行安全性分析、预测、策略制定等，将是信息物理安全风险防范未来发展的重点技术方向之一。具体而言，其技术核心在于充分利用泛在网无处不在的信息感知及物联网的物–物相连特性，以信息物理系统的可观、可测为基础，打造透明可视化的信息物理网络。并以安全、高效、可控为目标，结合系统安全性分析理论和大数据分析等互联网技术，实时了解物理系统的传输能力、供能质量、安全和可靠性水平，以及信息系统是否发生阻塞、丢包、时延等重要信息，从而对信息物理安全进行实时安全校验，同时预测系统存在的安全隐患，在线评估信息物理系统的运行状态，给出系统安全、警戒、危险等运行安全信号，为系统安全风险防范提供决策。

（2）信息物理安全基础理论研究。

目前，信息物理安全性理论研究大多聚焦于信息网络及物理网络攻击进程的建模模拟及风险预防，分析研究攻击类型、攻击者与被攻击对象响应之间的博弈进程等，以更好地制定安全风险防范策略[68-70]。

为了防范泛在设备互联互通给信息物理安全带来的多重复杂性，在透明感知的基础上，对CPPS的信息物理安全基础理论研究宜朝"快、准、好"的方向发展。关于"快"，一方面需加强数据压缩技术、稀疏存储技术在信息物理安全建模和计算中的应用；另一方面则需加强分布式算法的开发应用。通过高质量存储、大数据分割，弱化海量数据给信息物理安全分析带来的计算负担。关于"准"，建立信息物理安全的多维评价指标体系，结合离线模拟，在线实时监测分析等多种手段，准确定位系统的薄弱环节，分析系统的运行态势，准确挖掘潜在安全隐患。关于"好"，则需加强虚拟现实技术、人工智能技术在信息物理安全决策方面的发展，在确认安全隐患的同时，借助人及系统的思维提供高效的安全风险防范手段。

（3）区块链技术。

"互联网+"形势下，由于广泛用户愈发参与电力系统的辅助决策，也衍生出多元化的新型金融服务需求以及绿色电力证书、排污权、碳排放权等能源衍生品交易[71]。泛在设备互联互通带来的电力系统交易，在便捷化用户的同时，资金流、信息流、物理层电力流的多重交融使信息物理安全面临严峻挑战。

区块链技术作为去中心化、分布式的存储架构，具有信息公开透明、安全加密、可追溯以及不可篡改等特点[72-75]，与电力领域具有较高的契合度。针对泛在接入的个体，利用区块链技术实现身份认证、访问控制和分布式管理，通过多重签名、共识机制、智能合约等相关核心技术，为多且分散的电力交易主体提供交易安全，将更好地完善系统信息物理安全交易机制。区块链技术在CPPS的安全应用方面还处起步阶段，其在CPPS的应用技术核心突破还应朝着低延迟、低存储、低功耗等方向发展。

5　结语

基于"互联网+"技术与平台推进电力系统的数字化转型，实现电力系统的信息系统与物理系统的深度融合，对电力系统的高效化运行具有积极的意义。在总结当前电力系统发展信息物理融合的基础上，综述了当前CPPS的建模及相互作用影响分析研究进展，提出了在"互联网+"形势下CPPS相关技术的研究挑战，并结合泛在设备互联互通的信息物理融合特性，提出了相关关键技术发展趋势的研究展望。随着"互联网+"技术的发展，未来电网的可观、可测水平逐渐提高，将以透明可视的电力系统新形态展现出信息物理融合的魅力，更好地提高电力系

统的运维水平，万千主体在开放式平台上参与电力生产与消费，这将是未来信息物理融合下电力系统的新姿态。

参考文献：

[1] 李立涅，张勇军，徐敏. 我国能源系统形态演变及分布式能源发展[J]. 分布式能源，2017，2(1)：1-9.
LI Licheng，ZHANG Yongjun，XU Min. Morphological evolution of energy system and development of distributed energy in China[J]. Distributed Energy，2017，2(1)：1-9.

[2] 刘柳，王丹，贾宏杰，等. 综合能源配电系统运行域模型[J]. 电力自动化设备，2019，39(10)：1-9.
LIU Liu，WANG Dan，JIA Hongjie，et al. Operation region model for integrated energy distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39(10)：1-9.

[3] SALEHI V，MOHAMED A，MAZLOOMZADEH A，et al. Laboratory-based smart power system，part I：design and system development[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2012，3(3)：1394-1404.

[4] WANG D，LIU L，JIA H，et al. Review of key problems related to integrated energy distribution systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems，2018，4(2)：130-145.

[5] 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.

[6] GUNGOR V C，SAHIN D，KOCAK T，et al. Smart grid technologies：communication technologies and standards[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics，2011，7(4)：529-539.

[7] 鞠平，周孝信，陈维江，等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备，2018，38(5)：2-11.
JU Ping，ZHOU Xiaoxin，CHEN Weijiang，et al. “Smart Grid Plus” research overview[J]. Electric Power Automation Equipment，2018，38(5)：2-11.

[8] 顾为东. 能源4.0：重塑经济结构：互联网技术与智慧能源[J]. 中国工程科学，2015，17(3)：4-9.
GU Weidong. Energy 4.0：constructing the economic structure，internet technology and smart energy[J]. Engineering Science，2015，17(3)：4-9.

[9] WU F F，VARAIYA P P，HUI R S Y. Smart grids with intelligent periphery：an architecture for the energy internet[J]. Engineering，2015，1(4)：436-446.

[10] 张勇军，陈泽兴，蔡泽祥，等. 新一代信息能源系统：能源互联网[J]. 电力自动化设备，2016，36(9)：1-7，16.
ZHANG Yongjun，CHEN Zexing，CAI Zexiang，et al. New generation of cyber-energy system：energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment，2016，36(9)：1-7，16.

[11] 张国荣，陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备，2017，37(1)：1-7.
ZHANG Guorong，CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment，2017，37(1)：1-7.

[12] 南方电网公司. 南方电网数字化转型和数字南网建设行动方案(2019年版)发布：构建数字电网、数字运营、数字能源生态[N/OL]. (2019-04-30)[2019-11-27]. http://www.chinasmartgrid.com.cn/news/20190430/632616.shtml.

[13] 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)：59-69.
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)：59-69.

[14] LI Z Y，SHAHIDEHPOUR M，ALABDULWAHAB A，et al. Analyzing locally coordinated cyber-physical attacks for undetectable line outages[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2018，9(1)：35-47.

[15] DENG R L，ZHUANG P，LIANG H. CCPA：coordinated cyber-physical attacks and countermeasures in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2017，8(5)：2420-2430.

[16] 曹茂森，王蕾报，胡博，等. 考虑电-气耦合系统连锁故障的多阶段信息物理协同攻击策略[J]. 电力自动化设备，2019，39(8)：128-136.
CAO Maosen，WANG Leibao，HU Bo，et al. Coordinated cyber-physical multi-stage attack strategy considering cascading failure of integrated electricity-natural gas system[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39(8)：128-136.

[17] 冀星沛，王波，刘涤尘，等. 相依网络理论及其在电力信息-物理系统结构脆弱性分析中的应用综述[J]. 中国电机工程学报，2016，36(17)：4521-4533.
JI Xingpei，WANG Bo，LIU Dichen，et al. Review on interdependent networks theory and its applications in the structural vulnerability analysis of electrical cyber-physical system[J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(17)：4521-4533.

[18] 吴优，付立军，马凡，等. 基于HLA的舰船综合电力系统信息物理混合仿真[J]. 电网技术，2019，43(7)：2422-2429.
WU You，FU Lijun，MA Fan，et al. Cyber-physical co-simulation of vessel integrated power system based on HLA[J]. Power System Technology，2019，43(7)：2422-2429.

[19] FALAHATI B，FU Y，WU L. Reliability assessment of smart grid considering direct cyber-power interdependencies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2012，3(3)：1515-1524.

[20] 周兴社，杨亚磊，杨刚. 信息-物理融合系统动态行为模型构建方法[J]. 计算机学报，2014，37(6)：1411-1423.
ZHOU Xingshe，YANG Yalei，YANG Gang. Modeling methods for dynamic behaviors of cyber-physical system[J]. Chinese Journal of Computers，2014，37(6)：1411-1423.

[21] RIBEIRO L，BJORKMAN M. Transitioning from standard automation solutions to cyber-physical production systems：an assessment of critical conceptual and technical challenges[J]. IEEE Systems Journal，2018，12(4)：3816-3827.

[22] 刘振亚. 建设坚强智能电网 支撑又好又快发展[J]. 电网与清洁能源，2009，25(9)：1-3.
LIU Zhenya. Build strong smart grid as pillar of sound and rapid development[J]. Power System and Clean Energy，2009，25(9)：1-3.

[23] 李兴源，魏巍，王渝红，等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制，2009，37(17)：1-7.
LI Xingyuan，WEI Wei，WANG Yuhong，et al. Study on the development and technology of strong smart grid[J]. Power System Protection and Control，2009，37(17)：1-7.

[24] HOSSAIN E，HAN Z，POOR H V. Smart grid communications and networking[M]. Cambridge，United Kingdom：Cambridge University Press，2012：41-47.

[25] 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)：9-21.
WANG Qi，LI Mengya，TANG Yi，et al. A review on research of cyber-attacks and defense in cyber physical power systems part one modelling and evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems，2019，43(9)：9-21.

[26] 郭庆来，辛蜀骏，孙宏斌，等. 电力系统信息物理融合建模与综合安全评估：驱动力与研究构想[J]. 中国电机工程学报，2016，36(6)：1481-1489.

GUO Qinglai, XIN Shujun, SUN Hongbin, et al. Power system cyber-physical modelling and security assessment: motivation and ideas[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489.

[27] 李钦豪，张勇军，陈佳琦，等. 泛在电力物联网发展形态与挑战[J]. 电力系统自动化，2020，44(1)：13-22.
LI Qinhao, ZHANG Yongjun, CHEN Jiaqi, et al. Development patterns and challenges of ubiquitous power internet of things [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 13-22.

[28] METS K, VERSCHUEREN T, DEVELDER C, et al. Integrated simulation of power and communication networks for smart grid applications[C]//2011 IEEE 16th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks(CAMAD). Kyoto, Japan: IEEE, 2011: 61-65.

[29] 曾倬颖，刘东. 光伏储能协调控制的信息物理融合建模研究[J]. 电网技术，2013，37(6)：1506-1513.
ZENG Zhuoying, LIU Dong. Study on cyber-physical system modeling on coordinated control of photovoltaic generation and battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1506-1513.

[30] BARAN M, SREENATH R, MAHAJAN N R. Extending EMTDC/PSCAD for simulating agent-based distributed applications[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(12): 52-54.

[31] DAVIS C M, TATE J E, OKHRAVI H, et al. SCADA cyber security testbed development[C]//2006 38th North American Power Symposium. Carbondale, IL, USA: IEEE, 2006: 483-488.

[32] LIN H, VEDA S S, SHUKLA S S, et al. GECO: global event-driven co-simulation framework for interconnected power system and communication network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1444-1456.

[33] 汤奕，王琦，郜伟，等. 基于OPAL-RT和OPNET的电力信息物理系统实时仿真[J]. 电力系统自动化，2016，40(23)：15-21，92.
TANG Yi, WANG Qi, TAI Wei, et al. Real-time simulation of cyber-physical power system based on OPAL-RT and OPNET [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 15-21, 92.

[34] 汤奕，王琦，倪明，等. 电力和信息通信系统混合仿真方法综述[J]. 电力系统自动化，2015，39(23)：33-42.
TANG Yi, WANG Qi, NI Ming, et al. Review on the hybrid simulation methods for power and communication system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 33-42.

[35] HAVLIN S, STANLEY H E, BASHAN A, et al. Percolation of interdependent network of networks[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2015, 72: 4-19.

[36] GAO J X, BULDYREV S V, STANLEY H E, et al. Percolation of a general network of networks[J]. Physical Review E, 2013, 88(6): 062816.

[37] 叶夏明，文福拴，尚金成，等. 电力系统中信息物理安全风险传播机制[J]. 电网技术，2015，39(11)：3072-3079.
YE Xiaming, WEN Fushuan, SHANG Jincheng, et al. Propagation mechanism of cyber physical security risks in power systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3072-3079.

[38] 郑佩祥，陈柯任，文福拴，等. 电力信息物理系统中信息系统发生预想事故的影响[J]. 电力建设，2018，39(6)：89-95.
ZHENG Peixiang, CHEN Keren, WEN Fushuan, et al. Impacts of cyber contingencies on cyber physical power systems[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(6): 89-95.

[39] 李培恺，刘云，辛焕海，等. 分布式协同控制模式下配电网信息物理系统脆弱性评估[J]. 电力系统自动化，2018，42(10)：22-29，59.
LI Peikai, LIU Yun, XIN Huanhai, et al. Vulnerability assessment for cyber physical system of distribution network in distributed cooperative control mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 22-29, 59.

[40] 王涛，孙聪，顾雪平，等. 电力通信耦合网络建模及其脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报，2018，38(12)：3556-3567.
WANG Tao, SUN Cong, GU Xueping, et al. Modeling and vulnerability analysis of electric power communication coupled network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3556-3567.

[41] ZONOUZ S, DAVIS C M, DAVIS K R, et al. SOCCA: a security-oriented cyber-physical contingency analysis in power infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 3-13.

[42] 孙充勃，成晟，原凯，等. 基于节点映射模型的电力信息物理系统实时仿真平台[J]. 电网技术，2019，43(7)：2368-2375.
SUN Chongbo, CHENG Sheng, YUAN Kai, et al. Real time simulation platform of power cyber-physical system based on node mapping model[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2368-2375.

[43] 周力，吴在军，孙军，等. 融合时间同步策略的主从式信息物理系统协同仿真平台实现[J]. 电力系统自动化，2017，41(10)：9-15，91.
ZHOU Li, WU Zaijun, SUN Jun, et al. Realization of master-slave mode co-simulation in cyber physical system based on hybrid time synchronization strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 9-15, 91.

[44] RTDS Technologies. RTDS simulator overview[EB/OL]. (2014-02-11)[2019-11-27]. http://www.rtds.com/wp-content/uploads/2014/09/RTDS-Simulator-Overview.pdf.

[45] BÉLANGER J, LAPOINTE V, DUFOUR C, et al. eMEGAsim: an open high-performance distributed real-time power grid simulator. Architecture and specification[C]//Proceedings of the International Conference on Power Systems (ICPS 2007). Bangalore, India: [s.n.], 2007: 12-24.

[46] OPAI-RT Technologies. HYPERSIM power system real-time digital simulator[EB/OL]. (2015-02-11)[2019-11-27]. http://www.opal-rt.com/sites/default/file/Download/Hypersim_brochure_lores.pdf.

[47] ZHU K, CHENINE M, NORDSTROM L. ICT architecture impact on wide area monitoring and control systems' reliability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2801-2808.

[48] AHUJA S P. COMNET Ⅲ: a network simulation laboratory environment for a course in communications networks[C]// 28th Annual Frontiers in Education Conference. Tempe, AZ, USA: IEEE, 1998: 1085-1088.

[49] NUTARO J, KURUGANTI P T, MILLER L, et al. Integrated hybrid-simulation of electric power and communications systems[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA: IEEE, 2007: 1-8.

[50] BLUM R. Network performance open source toolkit: using Netperf, tcptrace, NISTnet, and SSFNet[M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2003: 17-25.

[51] ZENG X, BAGRODIA R, GERLA M. GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks[C]//Proceedings of the 12th Workshop on Parallel and Distributed Simulation. Banff, Alta., Canada: IEEE, 1998: 154-162.

[52] OPAL-RT Technologies. eMEGAsim powergrid real-time digital hardware in the loop simulator[EB/OL]. (2014-02-11)[2019-11-27]. http://ww.opal-rt.com/sites/default/files/OPB1_emegasimbrochure_DA14_hires.pdf.

[53] FARWELL J P, ROHOZINSKI R. Stuxnet and the future of cyber war[J]. Survival, 2011, 53(1): 23-40.

[54] 龚郁安. 关于委内瑞拉大停电事故的情况分析和关键基础设施的安全防护建议[J]. 信息技术与网络安全，2019，38(4)：1-2，14.

GONG Xian. Analysis of Venezuela's blackouts and suggestions on network security of critical infrastructure[J]. Information Technology and Network Security,2019,38(4):1-2,14.

[55] 黄良,高正浩,曹洪,等. 一二次系统融合的电网风险评估实用化计算方法及数据建模研究[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(17):104-110.
HUANG Liang,GAO Zhenghao,CAO Hong,et al. Research on calculation model for electric power system risk assessment with consideration of both primary and secondary system[J]. Power System Protection and Control,2016,44(17):104-110.

[56] 熊江咏,杨桂平,郭毅,等. ECT与EVT在智能配电设备一二次融合中相融性分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(1):108-114.
XIONG Jiangyong,YANG Guiping,GUO Yi,et al. Compatibility analysis of ECT and EVT in primary & secondary fusion of intelligent power distribution equipment[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2019,40(1):108-114.

[57] 郑佩祥. 配电网CPS理论架构和典型场景应用[J]. 中国电力,2019,52(1):10-16,31.
ZHENG Peixiang. Theoretical architecture and typical scenario applications of cyber physical systems in the distribution network[J]. Electric Power,2019,52(1):10-16,31.

[58] 李澍森,孙志英. 12 kV配电柱上开关一二次融合关键技术之交流电压传感器[J]. 高电压技术,2019,45(9):2818-2826.
LI Shusen,SUN Zhiying. Key technology of primary and secondary fusion of AC voltage sensor on overhead pole mounted switch in 12 kV distribution network[J]. High Voltage Engineering,2019,45(9):2818-2826.

[59] 钱远驰,周斌,熊江咏,等. 滞留电荷对智能配电设备一二次融合的影响与对策[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(1):123-128.
QIAN Yuanchi,ZHOU Bin,XIONG Jiangyong,et al. Influence and countermeasures on detention charge on primary & secondary fusion of intelligent distribution equipment[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2019,40(1):123-128.

[60] 李金华. 德国"工业4.0"与"中国制造2025"的比较及启示[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2015,15(5):71-79.
LI Jinhua. Comparison and enlightenment of German "Industry 4.0" and "Made in China 2025"[J]. Journal of China University of Geosciences(Social Sciences Edition),2015,15(5):71-79.

[61] 胡海涛,郑政,何正友,等. 交通能源互联网体系架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报,2018,38(1):12-24,339.
HU Haitao,ZHENG Zheng,HE Zhengyou,et al. The framework and key technologies of traffic energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(1):12-24,339.

[62] 杨尚林. 基于MEMS工艺的柔性基底磁通门传感器关键技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2016.
YANG Shanglin. Study on key techniques of the flexible substrate fluxgate sensor based on MEMS technology[D]. Xi'an:Northwestern Polytechnical University,2016.

[63] 姜华,李锡忠,秦孝来,等. 基于无源无线传感技术的电力电缆测温装置[J]. 仪表技术与传感器,2018(12):58-62.
JIANG Hua,LI Xizhong,QIN Xiaolai,et al. Power cable measured device based on passive wireless sensor technology[J]. Instrument Technique and Sensor,2018(12):58-62.

[64] 吴通华,郑玉平,周华,等. 基于功能纵向集成的无防护安装就地化线路保护[J]. 电力系统自动化,2017,41(16):46-52.
WU Tonghua,ZHENG Yuping,ZHOU Hua,et al. Vertically integrated outdoor installation line protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(16):46-52.

[65] 罗军舟,杨明,凌振,等. 网络空间安全体系与关键技术[J]. 中国科学:信息科学,2016,46(8):939-968.
LUO Junzhou,YANG Ming,LING Zhen,et al. Architecture and key technologies of cyberspace security[J]. Scientia Sinica(Informationis),2016,46(8):939-968.

[66] REISING D R,TEMPLE M A,MENDENHALL M J. Improved wireless security for GMSK-based devices using RF fingerprinting[J]. International Journal of Electronic Security and Digital Forensics,2010,3(1):41-59.

[67] 能源杂志. 中国工程院院士李立涅理想中的"透明电网"是何方神圣?[N/OL]. (2018-09-11)[2019-11-27]. http://shupeidian.bjx.com.cn/html/20180911/927093.shtml.

[68] 张殷,肖先勇,李长松. 基于攻击者视角的电力信息物理融合系统脆弱性分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):81-88.
ZHANG Yin,XIAO Xianyong,LI Changsong. Vulnerability analysis of cyber physical power system from attacker's perspective[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(10):81-88.

[69] 阳育德,蓝水岚,覃智君,等. 电力信息物理融合系统的网络-物理协同攻击[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):97-103.
YANG Yude,LAN Shuilan,QIN Zhijun,et al. Coordinated cyber-physical attacks of cyber-physical power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(2):97-103.

[70] XIANG Y M,WANG L F,LIU N. Coordinated attacks on electric power systems in a cyber-physical environment[J]. Electric Power Systems Research,2017,149:156-168.

[71] 王强. 电力与能源环境衍生品协调交易研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
WANG Qiang. Research on the coordinated trading between electricity and energy derivatives[D]. Beijing:North China Electric Power University,2017.

[72] MENGELKAMP E,NOTHEISEN B,BEER C,et al. A blockchain-based smart grid: towards sustainable local energy markets[J]. Computer Science-Research and Development,2018,33(1/2):207-214.

[73] DONG Z Y,LUO F J,LIANG G Q. Blockchain:a secure,decentralized,trusted cyber infrastructure solution for future energy systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2018,6(5):958-967.

[74] 杨挺,赵俊杰,张卫欣,等. 电力信息物理融合系统数据区块链生成算法[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):74-80.
YANG Ting,ZHAO Junjie,ZHANG Weixin,et al. Data blockchain generation algorithm of cyber physical power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(10):74-80.

[75] WHITFIELD S. Will blockchain become the new operational backbone in energy?[J]. Journal of Petroleum Technology,2018,70(5):30-33.

作者简介:

王东芳

王东芳(1986—),女,山东济宁人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统及自动控制、继电保护、智能配电网技术、配电网自动化(**E-mail**:13829310545@139.com);

张勇军(1973—),男,广东河源人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为低压智能配电网技术、电力系统无功规划(**E-mail**:zhangjun@scut.edu.cn);

陈家超(1995—),男,广东普宁人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为智能配电网技术、配电网自动化(**E-mail**:1298554802@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Review and prospect of cyber-physical development of power system under background of "Internet+" technology

WANG Dongfang[1],LIU Shuiyuan[1],ZHANG Yongjun[2],SONG Xudong[3],LIN Xiaoming[2],CHEN Jiachao[2]
(1. Heyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co.,Ltd.,Heyuan 517000,China;
2. Research Center of Smart Energy Technology,School of Electric Power,
South China University of Technology,Guangzhou 510640,China;
3. Energy Technology Co.,Ltd.,Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co.,Ltd.,
Guangzhou 510080,China)

Abstract: The transformation of energy technology promotes the development of power system technologies, and the innovative application of "Internet+" technology strengthens the connection between cyber system and physical system of electric power system. On the basis of comparing the informatization construction process of power system, the core characteristic of cyber-physical fusion is elaborated. Then, based on the research category of CPS(Cyber-Physical System), the research progress of cyber-physical power system in modeling analysis and interaction is summarized from two dimensions of numerical simulation and mechanism analysis, and the research challenges of related technologies are proposed for cyber-physical power system under the integration and innovation of "Internet+" technology. Finally, the development trend of key technologies of cyber-physical power system, such as primary-secondary integration, chip sensing, transparent network, blockchain, and so on, is prospected under the situation of "Internet+" technology.

Key words: "Internet+"; cyber-physical system; electric power systems; primary-secondary integration; transparent network

(上接第 75 页 continued from page 75)

Prognosis of remaining lifetime of wind turbine unit shafting

ZHAO Hongshan,LI Zili
(School of Electrical and Electronic Engineering,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: As a key component of the transmission system, the accurate prognosis of shafting remaining lifetime of the wind turbine unit is beneficial to the optimization of maintenance plan and the reduction of operating cost effectively. A degeneration-torsional vibration coupling model of wind turbine unit shafting is proposed, which combines the slow degradation process and rapid rotation behavior, and the influence of uncertain wind speed on unit shafting degradation is introduced. Using the fourth-order Runge-Kutta algorithm and rainflow statistics method, the degradation curve is obtained by multiple Monte Carlo simulations, and the expectation and variance of remaining lifetime are further obtained. The results show that the degradation of the wind turbine unit shafting is exponential, and the expectation and variance of the remaining lifetime are negatively exponential with the degradation.

Key words: wind turbines; unit shafting; degradation; remaining lifetime; Monte Carlo simulation; rainflow statistics method