

新一代信息能源系统:能源互联网

张勇军,陈泽兴,蔡泽祥,李立涅,宋伟伟

(华南理工大学 电力学院 广东省绿色能源技术重点实验室,广东 广州 510640)

摘要:“互联网+”技术正逐渐渗透能源行业,并推动智能电网与能源网深度融合。从多耦合能量流的随机动态特性、广域互联网信息资源的整合能力、能量-信息流的互作用特性 3 个方面分析智能电网与能源网融合背景下,能源互联网所构建的新一代信息能源系统(CES)的形态特征;并以 CES 建模、系统分析方法、控制方法 3 个核心技术为对象,概述 CES 在智能电网中的发展概况,进而提出相关核心技术在新一代 CES 中的发展挑战。

关键词:信息能源系统;能源互联网;互联网+;技术挑战

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.001

0 引言

全球性的能源危机和能源需求持续增长,使得现有能源生产和消费的架构局限和矛盾突显^[1-2]。分布式可再生能源的迅猛发展、国家“互联网+”行动计划的出台、需求和理念更新等主客观推动因素的涌现,促使了智能电网扩大其互联范围,深度融合其他能源网络(如天然气网、冷/热网、氢能源网等),并以互联网理念构建新型信息-能源融合的“能源互联网”^[3-4]。

目前,国内正掀起能源互联网研究的浪潮,清华大学成立能源互联网创新研究院,并与四川省政府共建能源互联网产业研究院,探索应用技术与产业的结合;同时,不少文献也纷纷提出了对能源互联网的见解^[3,5-7],或是综合能源网与能源互联网的异同^[8]。但总体而言,能源互联网将在广域多能源流系统的基础上,借助信息互联网,实现能源产消者之间的按需传输及友好互动。在此背景下,能量流与信息流将高度耦合,信息物理融合系统 CPS(Cyber Physical System)成为核心发展方向。

美国国家科学基金会 NSF(National Science Foundation)于 2006 年提出 CPS,定义其为将计算与物理资源紧密结合所构成的系统^[9]。对于 CPS,目前学术界主要认为其是通过 3C(Computation, Communication, Control)技术将计算、网络和物理环境融为一体的多维复杂系统^[10-11];相比传统的嵌入式设备以及由实时嵌入式系统发展起来的混成系统,CPS 则更加强调计算设备与外界物理环境的整合,而不仅仅专注于系统逻辑控制本身^[12];现有传感器网络及近年来提出的物联网 IoT(Internet of Things)

均强调信息感知、传递与共享,后者是前者的发展,其目的是打造更广域的传感网络以实现跨界信息融合^[10,13],而 CPS 则更注重对所获取信息的响应能力,以此对物理系统进行实时反馈控制。在某种程度上,CPS 可视为网络化控制系统的进一步发展,但 CPS 中节点信息的智能预处理、决策反馈功能将更加强大,并实现系统态势感知^[12-14]。

CPS 具有广泛的应用范围^[10,15],国内外提出信息物理能源系统 CPES(Cyber Physical Energy System)以论述 CPS 在能源领域的应用^[16-17],更直接地,可称之为信息能源系统 CES(Cyber-Energy System)。广义上看,智能楼宇、智能电网等能源系统均可视为不同层次的 CES。目前对 CES 的研究仍多以“电”为主要能量形式^[17-18],也有文献提出电力信息物理融合系统 CPPS(Cyber Physical Power System)的概念^[10],其以实现电网智能化为导向,探索 CPS 在智能电网中的框架设计以及功能实现的关键支撑技术,包括系统建模、分析方法、运行控制、形式化验证等^[15],核心内涵是如何有效地实现信息系统与电力系统的相互融合与协作。

能源互联网中多耦合能量流与“互联网+”的特性将决定其有别于现所述的智能电网,其本质是形成新一代 CES,相关关键技术将比电网信息物理融合系统更具挑战。

综上,本文将论述能源互联网所构建的新一代 CES 的形态特征,并在系统建模、分析、控制三大基础技术上,结合 CPPS 的研究概况,探讨新一代 CES 相关技术发展挑战。

1 新一代 CES 的形态特征

新一代 CES 是以智能电网为核心网络,融入 Internet 基础设施和技术,以可再生能源为主要一次能源,横向上实现多源(天然气系统、冷热供应系统等)互补,纵向上实现“源-网-荷-储”协调,是一种面向用户的高效综合能源利用系统^[3-6]。CES 与现有工业

收稿日期:2016-03-29;修回日期:2016-06-16

基金项目:中国工程院重大咨询项目(2015-ZD-09-09)

Project supported by Major Consulting Program of Chinese Academy of Engineering(2015-ZD-09-09)

控制系统所提出的 CPS 及其所衍生的概念 CPPS/CPES 关系如图 1 所示。

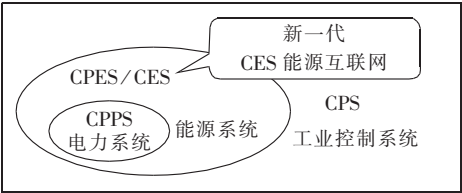


图 1 CPS 相关概念体系
Fig.1 Conceptional system of CPS

结合 CPS 的概念,新一代 CES 亦是信息系统与能源系统 2 个异构系统的深度耦合,其将通过先进通信、传感技术,实现能源系统的实时感知、动态控制和信息服务,能量-信息流呈现新的特征,如图 2 所示。

1.1 具有随机动态特性的多耦合能量流

电能的传输具有瞬时性、难储、动态平衡的特点;天然气网、冷/热网、氢能源网能量流传输的惯性较电网大,呈现一定的滞后性,且其能量能够在网络中进行较大规模的储存。新一代 CES 融合了多种不同形式的能量流,将综合其互异特性,实现刚性系统与柔性系统并存。同时,能源生产端随着大量分布式可再生能源(风、光等)接入,强波动性、强随机性取代了传统电网较平稳、可控的能源生产;能源消费终端则随着与实时电价相关的柔性负荷(如电动汽车、储能等)大规模接入,能量流的随机动态特性将大幅增强,能源系统“源-网-储-荷”动态行为将变得更为复杂。而随机动态特性的冲击将给能源系统安全稳定带来威胁,也给能源系统的协调控制带来更大的挑战,对能源系统更短时间尺度的动态特性研究显得愈发重要。

1.2 引入具强信息资源整合能力的互联网

相比传统电力专用通信网,新一代 CES 引入互

联网技术,其最大的作为在于以信息的“开放对等”激发用户响应潜力,重视需求侧响应,一同参与能源系统调控,如调峰、调频等。

广域互联网下信息流具有快速性及全局共享式的特点。能源系统中海量设备的数据、随机动态特性的高阶数学描述将使信息规模增加若干数量级,大量数据经由 Internet 进行通信,并借助云计算等分布式计算系统实现广域互联网中大量数据的降维、同步分析,而以大数据技术实现对数据底层信息的挖掘^[19];加之新型传感技术、通信技术的发展,信息资源整合能力将大幅增强,如图 3 所描述。但与此同时,在融合了互联网的背景下,信息系统中大量信息节点的优化布置、信息传输通道的优化亦存在技术挑战。

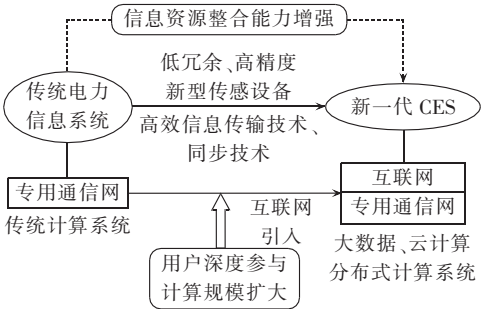


图 3 信息系统的演化
Fig.3 Evolution of information system

1.3 能量流-信息流互作用特性增强

新一代 CES 的能量流与信息流深度融合并相互影响,呈现强互作用特性。能源系统的随机动态过程被实时追踪并由传感器设备、通信网络甚至 Internet 送到计算系统,借助其强大的计算能力使得能源系统的运行特性得到优化和提升。能源系统的故障,信息系统可迅速做出响应从而引起能量流变化;信息系统的故障,则将不能被简单割裂,否则可能导致连锁故障在信息系统和能源系统之间传播并致使整个系统

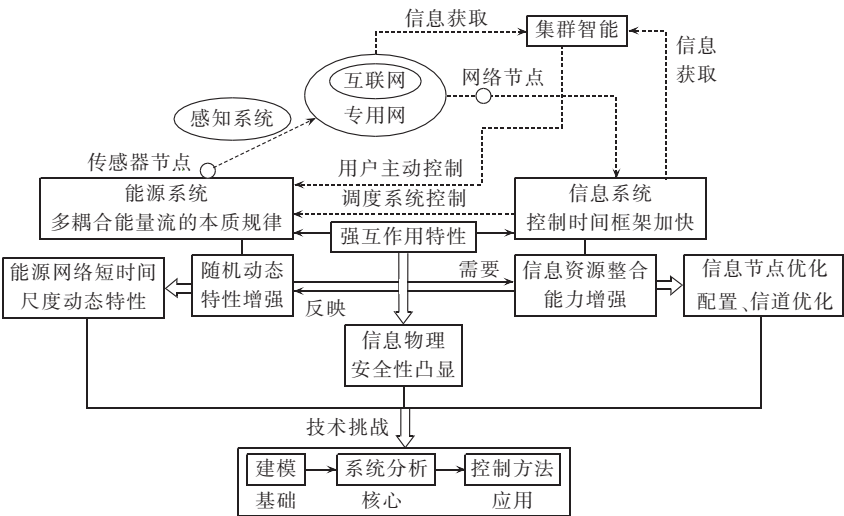


图 2 新一代 CES 的形态特征
Fig.2 Morphological characteristics of new CES

崩溃。可见,信息系统的安全性及其对能源系统安全性的影响将极度凸显。

此外,互联网所带来的信息公开、透明化将实现人-物-信息三者之间的互联。用户基于所获得的信息改变了其用能习惯,并直接主动参与能源系统的调控,为集群智能提供了基础。

2 新一代 CES 的建模

2.1 CPPS 建模概况

电力系统的时序特性与信息系统的信息/事件驱动特性之间的差异成为 CPPS 建模的难点。如何兼顾以微分/代数方程等连续数学作为时域信息描述的电力系统与以离散数学为基础的信息系统两者的结合,体现连续性与离散性的异构系统融合特征,削弱互斥影响,并在时间尺度上实现同步与实时性,成为 CPPS 统一建模的特征与关键^[10]。

文献[20]提出了基于动态链接库桥接物理、信息模型的物理信息融合 CP(Cyber-Physical)建模方法,用以实现物理、信息模型的一一对应,并通过建立光伏储能发电系统的物理信息模型进行仿真验证;文献[21]基于数学理论和编程方法构建了通信、计算、电力的混合动力系统模型,并用以评估电力系统的暂态稳定性;文献[22]通过符号串编码的方式形成了电力信息物理融合系统建模和稳定性评估的数学框架;文献[23]设计了电力系统信息传递的过程,在此基础上研究系统的分层分区控制及统一控制;文献[24]则由电力系统负荷角度着手,将负荷的周期变化特性与任务的进程做类比,用实时任务模拟电力系统负荷的行为进行建模并实现电力负荷的有效管理。上述文献主要以满足电力系统能量流管理的需求为目的,构建了物理-信息实时对接的模型。

而在信息流层面,文献[25]针对 CPPS 通信安全问题,提出了信息脆弱性指标,并基于此构建实时模型研究系统受信息攻击的影响;文献[26]和文献[27]分别以采样时间和信息路径为优化对象,通过对其控制以期实现 CPPS 信息系统与物理系统间的实时同步性;文献[28-29]则从实现信息系统对物理系统支撑的角度,用数学形式描述了发电、负荷以及配电网的基于信息结构的动态模型,并通过相互之间信息的交互实现系统全局可观性;文献[30]基于微分代数方程组、有穷自动机、随机过程、排队论等数学工具,建立 CPPS 稳态和动态模型,较为系统地讨论了电力信息与物理融合建模问题。

2.2 新一代 CES 建模技术发展挑战

新一代 CES 建模在 CPPS 建模的基础上需要重点考虑以下 2 个特征:

a. 新一代 CES 中能量流、信息流以及相互之间

作用下的随机动态特性的数学描述;

b. 能源、信息系统节点状态量的选取以减少系统信息冗余量,以适应广域互联网下大量数据交互的情景。

2.2.1 基于随机微分方程的动态特性建模思路

基于代数方程组可进行能源-信息系统的稳态描述。而在动态特性方面,随着新一代 CES 随机动态特性的增强,系统部分元件随机性对系统的影响需受到重视,如可再生能源发电、电动汽车负荷、信息系统中的传感单元等^[30-31],数学工具可借助随机微分方程,模型如下:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) + y(t) \quad x(t_0) = x_0 \quad (1)$$

其中, $f(x, t)$ 为系统元件动态特性方程, x 为元件状态变量, t 为时间; x_0 为初态; $y(t)$ 为随机激励项,结合元件特性对此随机项的量化描述为分析重点。如文献[32]基于单机无穷大系统构造了带有高斯型随机激励项的非线性随机微分方程,用其分析系统稳定性并发现了新的失稳现象。

另一方面,传统电力传输网络在动态分析过程中往往忽略其电磁暂态特性,以代数方程进行描述。新一代 CES 耦合了不同的能量流,天然气、供冷/热网等流体的状态量时常不同于电,因此,在能源网络动态分析中,其滞后特性需以微分方程描述其动态过程。

因此,新一代 CES 可以深入研究基于随机微分方程的建模及其对应数值积分算法,联立传统微分方程及代数方程,求解能源系统动态响应轨迹。

2.2.2 基于减少信息冗余的模块化建模构想

模块化建模构想是指将一种设备(发电机、负荷等)或几种设备组成的可以实现内部信息自治的闭环系统(如具备孤岛运行能力的微电网)视为一个模块,同时,找准模块内部元件的关键状态量,并作为信息与外部网络进行交互,减少信息冗余,以系统思维构建各模块的信息-物理模型。所有交互信息量则作为信息节点计入信息系统建模,与能源系统实现交替迭代求解。此建模构想在某种程度上是对大量信息节点做了第一级优化。

图 4 是模块化建模构想的一种描绘,阐述了 2 种不同能量流的耦合(如电力流和天然气),实现两者交互的关键设备——能量枢纽,其信息-物理模型是未来研究的重点。通过耦合矩阵构建数学模型描述能量枢纽的物理特性并进行能源系统经济性分析正成为研究热点^[33],但能量枢纽的信息-物理模型构建还鲜有文献提及,事实上,能量枢纽作为多能源系统中的一个纽带,地位可类比电力系统中的“变电站”,其信息-物理安全关乎整个能源系统,构建其信息-物理模型进行系统安全评估尤为重要。另一方面,能

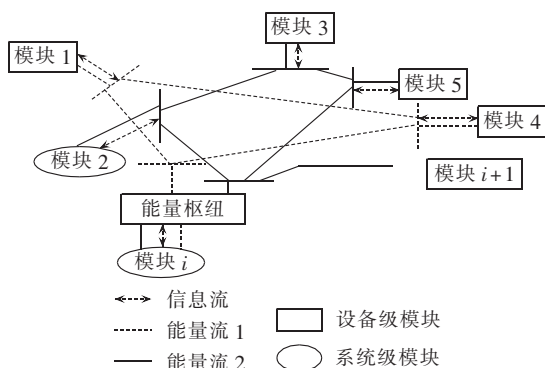


图 4 模块化建模的构想

Fig.4 Conception of modular modelling

量枢纽的建模需进一步考虑不同能源之间转换的时间滞后特性,以及能源转换器所表征的动态行为在信息系统中的对应状态量。

3 新一代 CES 的系统分析方法

3.1 CPPS 分析方法概况

CPPS 分析基于所建立的信息-物理融合模型,一方面通过数学方法,分析信息-物理协同下的系统特性,如安全性分析、可靠性分析等,以期指导规划;另一方面,充分利用自主感知、采集传输、计算处理等方法对电网状态进行感知分析和预测,以指导系统实时控制,现在多称为“态势感知 SA (Situation Awareness)”^[34]。

电网潮流、信息流传播的稳态与动态分析是 CPPS 分析的基础。电网稳态确定潮流及基于随机理论的不确定潮流计算方法已较为成熟^[35],而电网信息系统的稳态与动态分析方法,以及协同信息系统通信与信息处理能力的电网动态潮流计算系统处于发展阶段,文献[36]还提出基于异步迭代和公共对象请求代理模式下的分布式动态潮流计算模型,使计算系统向工程实用化迈进。

CPPS 的可靠性和安全性分析主要考虑信息系统故障导致的网络阻塞对物理系统的影响,如部分数据包丢失、数据延时等。可靠性分析方面,文献[30]借鉴电力系统可靠性分析的 $N-1$ 原则,以移除信息系统不同设备研究信息物理系统的可靠性,同时还提出了以建立不同设备的概率模型为基础,借助随机过程等数学理论进行可靠性评估。而在信息物理安全性研究方面,主要研究内容如下。

① 常见信息网络攻击类型研究,如病毒、漏洞、窃听、虚假信息注入等^[37],其中虚假信息注入由于其攻击信息系统较薄弱的传感装置环节,对该类攻击手段的研究受到国内外研究者广泛关注^[38-39]。

② 信息网络攻击进程建模研究,如采用攻击树作为攻击过程的建模工具,进行攻击场景条理化分析^[40],以博弈论为数学基础研究攻击者与调度人员

在信息系统受攻击时相互之间的博弈行为等^[41]。

③ 信息网络如何提高风险意识及防御水平对策研究,主要措施集中在对信息系统不同层级(感知层、传输层、应用控制层等)分别加设安全措施^[42-43];文献[44]还借鉴电力系统安全分析理论建立了基于预想事故分析的信息物理安全分析架构。

电网态势感知是指在一定时空范围内,集电网信息采集、理解和预测为一体,以实时动态掌握电网运行轨迹并判断其运行趋势为目标的一项新兴技术^[34,45],已有文献提出将该技术应用于智能电网自动调度^[34],其在电网 CPS 的实时状态估计、预测将有广泛的前景,目前国内外仍处于起步阶段。

3.2 新一代 CES 分析方法发展挑战

新一代 CES 信息物理安全性分析的需求凸显,其分析基础,如海量设备异构数据之间的统一认证与交互、耦合能量流、复杂信息流的动态分析也面临挑战。如图 5 框架所述。

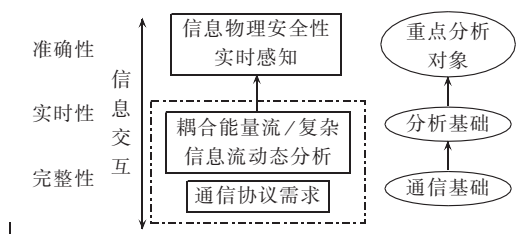


图 5 新一代 CES 分析方法应对挑战

Fig.5 Analysis method of new CES

3.2.1 广域互联网下 CES 分析的通信协议

新一代 CES 将广泛适应大量不同物理设备的接入,同时在互联网的架构体系下,海量的数据处理将逐渐依赖于分布式计算系统。不同设备、不同计算系统、计算系统与设备之间的对话对统一通信协议的需求愈发明显,作为通信基础,它将定义语法(数据格式、编码等)、语义(数据内容、控制信息等)、定时规则(通信顺序、速率匹配等),以确保信息的完整、准确、实时传输。

不少文献指出,在 CPS 提出之时,学术界提出以信息物理互联网 CPI (Cyber Physical Internet) 的 6 层通信协议栈作为 CPS 的通信协议,在探讨 CPPS 时也将通信协议列为一项重点,但关键技术目前仍存在挑战^[10,46]。新一代 CES 通信协议相关技术如物理设备数据格式的统一定义、网络地址分配、计算系统的同步等仍迫切需要解决,以此来实现能源-信息异构网络之间的网间认证和数据交换,是系统分析的基石。

3.2.2 基于云计算的能量-信息流动态分析

新一代 CES 能量-信息流的交互分析应涉及稳态和动态 2 个层面。未来融合网络的动态特性加快,物理系统高度依赖信息系统实现整体优化运行与控制,进行能量-信息流的动态分析,目的在于求

解信息系统在发生阻塞、故障而处于暂态时,或物理系统发生故障时,物理系统与信息系统间交替影响的暂态时域轨迹,以评估整个能源系统的安全稳定性。

云计算属于分布式计算的一种,具有超大规模计算能力、高可靠性、通用性和可扩展性的优点,它可以很好地解决能源网络规模过大以及数据广域分布的问题,将成为能量-信息流动态分析的有效工具。3.1 节中提及已有相关文献对电网分布式动态潮流及其工程实用化进行研究^[36],信息系统中常用数据包级仿真和流仿真^[30,47-49]进行动态过程分析。但在新一代 CES 中,综合考虑不同能源网的差异性及动态过程响应特性,与信息流动态方程联立,进行分布式能量-信息流的动态分析仍未见有相关文献提及;基于云计算强大的数据处理能力、分布式计算能力,实现能量-信息流交互的动态特性分析仍待研究。

3.2.3 信息物理安全实时感知

常见的安全性分析多基于预想事故集的方法构建一系列规则策略库,其在新一代 CES 高复杂度之下的适应性存疑。反之,实时追踪物理系统并对其进行信息物理安全性的在线分析、预测,进而及时采取防御措施的信息物理安全实时感知将成为新一代 CES 的技术挑战之一。其核心在于态势感知技术的发展,以其对物理系统可见性的提高及预测能力,实时为新一代 CES 提供安全保障。

同时,为了保证信息的及时、准确获取以便系统能够进行感知预测,一方面需要深入研究延迟/中断容忍网络技术^[47],使新一代 CES 有很强的处理信息延迟和中断的能力;另一方面则需要加强全球 GPS 纳秒级同步技术的研发,增强信息物理系统的同步性。

4 新一代 CES 控制技术

4.1 CPPS 控制技术概况

CPPS 控制基于信息-物理融合模型及相应系统分析方法,能够更灵敏地感知环境变化,将更好地对电网进行协调控制,控制技术框架如图 6 所示。

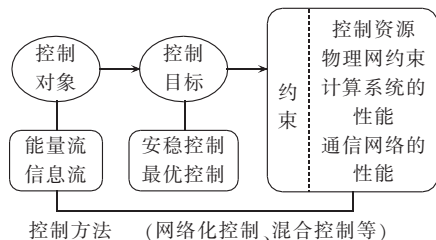


图 6 CPPS 控制分析研究架构

Fig.6 Frame of CPPS control method

如图, CPPS 控制类似于传统控制,其解决的亦是满足系统约束条件下,以某种控制目的对控制对象实现控制,但在 CPPS 架构下,约束中还重点考虑了计算系统、通信网络的性能。它们分别主要指系统

控制算法的最高时间复杂度、通信网络最大信息流容量。这 2 个约束体现了 CPPS 控制中,信息系统与物理系统的相互影响。控制对象则从传统关注电网能量流转移到能量-信息流的协调控制,如信息传输过程的优化,通过减少时延以保证系统的实时性。

控制方法上,为解决网络化控制系统 NCS(Networked Control System)过分依赖通信网络的缺点,集就地控制和网络化控制于一体的混合控制技术正成为研究热点^[10,30]。其难点在于如何协调全局控制和本地控制之间的灵活切换并使系统最优。此外也有文献在网络化控制的基础上,研究通信网络延迟和信息丢包的解决办法,如延迟和丢失补偿^[50],核心方法在于借助当前点信号的特征对未来几个时段进行控制信号的预测,以便于在信息丢失时进行补偿。

4.2 新一代 CES 控制技术发展挑战

4.2.1 能量-信息流的分布式动态优化新算法

新一代 CES 以实现能源的综合高效利用为目标,借助信息-能源系统对复杂能量-信息流的实时优化调度成为必须。而新形势下对新一代 CES 的能量-信息流的优化控制算法的进一步需求如下。

① 建设适应云计算等分布式计算系统:新一代 CES 中存在大量的物理设备、传感设备,广域协调优化控制下需要借助于分布式计算系统的快速计算能力,以保证控制的实时性。

② 计及系统调控资源、计算系统、通信网络的动态变化约束,对优化控制点进行实时更新。

③ 应增加当前运行点下对后续若干优化点的预测,以备信息网络故障时实现就地优化控制。

4.2.2 机制引导:用户深度参与分散优化决策

新一代 CES 将使传统能源用户发展为产消者追求能源共享和互动,大量用户将成为参与系统优化决策不可或缺的角色。用户在能源系统中的行为并不受系统调度支配,它需要相应机制来引导,如政策、市场机制等。因此,深度研究相应的引导机制,如实时能源价格制定、高峰节能低谷用能奖励机制等,使用户深度参与分散优化决策,实现集群智能,在未来值得高度重视。

5 结论

在全球能源危机、环境污染、“互联网+”技术蓬勃发展等背景下,智能电网与能源网正在深度融合,形成能源互联网,其将构建新一代 CES。多耦合能量流的随机动态特性显著,广域互联网下的信息资源整合能力增强、能量-信息流的互作用特性增强,成为新一代 CES 的主要形态特征。

(1) CPS 建模是 CPS 分析及控制的基础,新一代 CES 建模应重点关注系统随机动态特性并考虑

减小信息冗余,基于随机微分方程系统动态特性建模及模块化建模思想是值得研究的重点方向。

(2) CPS分析基于所建立的模型,同时亦是实现系统控制的前提,是CPS的核心技术。新一代CES的系统分析应在通信协议需求、云计算下的能量信息流动态分析、信息物理安全实时感知等方面取得突破。

(3) 实现对CPS安全、稳定、优化控制是建立CPS的最高形态应用。新一代CES控制技术在建立能源信息流的分布式动态优化新算法、建立机制引导用户参与分散优化决策等方面仍具挑战。

参考文献:

- [1] KHAN M A, KHAN M Z, ZAMAN K, et al. Global estimates of energy consumption and greenhouse gas emissions [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 29(7): 336-344.
- [2] WANG Y F, LI K P, XU X M, et al. Transport energy consumption and saving in China [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 29(7): 641-655.
- [3] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [4] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 1-5.
DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5.
- [5] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world [M]. New York, USA: Palgrave MacMillan, 2011: 107-161.
- [6] 刘振亚. 全球能源互联网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 204-210.
- [7] 于慎航, 孙莹, 牛晓娜, 等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 104-108.
YU Shenhang, SUN Ying, NIU Xiaona, et al. Energy Internet system based on distributed renewable energy generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 104-108.
- [8] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy Internet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [9] SHA L, GOPALAKRISHNAN S, LIU X, et al. Cyber-physical systems: a new frontier [C]//IEEE International Conference on Sensor Networks. Taichung, China: IEEE, 2008: 3-13.
- [10] 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.
- [11] RAJKUMAR R, LEE I, SHA L, et al. Cyber-physical systems: the next computing revolution [C]//Proceedings of the 47th Design Automation Conference (DAC). Anaheim, California, USA: [s.n.], 2010: 736-741.
- [12] 王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述 [J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1157-1166.
WANG Zhongjie, XIE Lulu. Cyber-physical systems: a survey [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(10): 1157-1166.
- [13] RADHA P. Point of view: cyber-physical systems: close encounters between two parallel worlds [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(8): 1363-1366.
- [14] SHIN D H, HE S, ZHANG Junshan. Robust, secure, and cost-effective design for cyber-physical systems [J]. IEEE Intelligent Systems, 2014, 29(1): 66-69.
- [15] 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.
- [16] PALENSKY P, WIDL E, ELSHEIKH A. Simulating cyber-physical energy systems: challenges, tools and methods [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2014, 44(3): 318-326.
- [17] 刘汉宇, 牟龙华. 微电网CPS体系架构及其物理端研究 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 34-37.
LIU Hanyu, MU Longhua. Architecture of microgrid CPS and research of its physical side [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 34-37.
- [18] LI H, ZANG C, ZENG P, et al. A stochastic programming strategy in microgrid cyber physical energy system for energy optimal operation [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2015, 2(3): 296-303.
- [19] 曹军威, 袁仲达, 明阳阳, 等. 能源互联网大数据分析技术综述 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 1-12.
CAO Junwei, YUAN Zhongda, MING Yangyang, et al. Survey of big data analysis technology for energy internet [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11): 1-12.
- [20] 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.
- [21] SUSULI Y, KOO T J, EBINA H, et al. A hybrid system approach to the analysis and design of power grid dynamic performance [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 225-239.
- [22] KOLACINSKI R M, LOPARO K A. A mathematic framework for analysis of complex cyber-physical power system [C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: [s.n.], 2012: 1-8.
- [23] IAN A H. Power system modeling for inverse problems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2004, 51(3): 539-551.
- [24] FACCHINETTI T, DELLA V M L. Real-time modeling for direct load control in cyber-physical power systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(4): 689-698.
- [25] SRIVASTAVA A, MORRIS T, ERNSTER T, et al. Modeling cyber-physical vulnerability of the smart grid with incomplete information [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 235-244.
- [26] BRADLEY J M, ATKINS E M. Computational-physical state co-

- regulation in cyber-physical systems[C]//2011 IEEE/ACM International Conference on Cyber-Physical System (ICCPs). Chicago, IL, USA: [s.n.], 2011: 119-128.
- [27] YU X F, TOMSOVIC K. Application of linear matrix inequalities for load frequency control with communication delays[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1508-1515.
- [28] ILIC M, XIE LIN, KHAN U A, et al. Modeling of future cyber physical energy systems for distributed sensing and control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2010, 40(7): 825-838.
- [29] ILIC M D, XIE Le, KHAN U A, et al. Modeling future cyber-physical energy systems[C]//Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. Pittsburgh, PA, USA: [s.n.], 2008: 1-9.
- [30] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 1-8.
- ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 1-8.
- [31] 刘咏飞, 鞠平, 薛禹胜, 等. 随机激励下电力系统特性的计算分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 137-142.
- LIU Yongfei, JU Ping, XUE Yusheng, et al. Calculation analysis on power system characteristics under random excitation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 137-142.
- [32] GEIDL M, KLOKL B, KOEPEL G, et al. Energy hubs for the futures[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007(1): 24-30.
- [33] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
- WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [34] 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): 3635-3641.
- YANG Shengchun, TANG Biqiang, YAO Jianguo, et al. Architecture and key technologies for situational awareness based automatic intelligent dispatching of power grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 3635-3641.
- [35] 彭寒梅, 曹一家, 黄小庆, 等. 基于组合抽样的含分布式电源随机潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 28-34.
- PENG Hanmei, CAO Yijia, HUANG Xiaoqing, et al. Probabilistic load flow calculation based on combination sampling for power system containing distributed generations [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 28-34.
- [36] 张海波, 蒋良敏, 陶文伟, 等. 实用化分布式动态潮流计算系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 67-71, 76.
- ZHANG Haibo, JIANG Liangmin, TAO Wenwei, et al. Design and implementation of a practical distributed power flow calculation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 67-71, 76.
- [37] MO Y, KIM H J, BRANCIK K, et al. Cyber-physical security of a smart grid infrastructure[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 195-209.
- [38] YUAN Yanling, LI Zuyi, REN Kui. Modeling load redistribution attacks in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 382-390.
- [39] LIU Y, NINU P, REITER M K. False data injection attacks against state estimation in electric power grids[J]. AC'M Transactions on Information and System Security, 2011, 14(1): 1-33.
- [40] REN Dandan, DU Suguo, ZHU Haojin. A novel attack tree based risk assessment approach for location privacy preservation in the VANETs[C]//2011 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kyoto, Japan: [s.n.], 2011: 1-5.
- [41] BACKHAUS S, BENT R, BONO J, et al. Cyber-physical security: a game theory model of humans interacting over control systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2320-2327.
- [42] 马韬韬, 李珂, 朱少华, 等. 智能电网信息和通信技术关键问题探讨[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 87-91.
- MA Taotao, LI Ke, ZHU Shaohua, et al. Discussion about information and communication technology of smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 87-91.
- [43] BURMESTER M, MAGKOS E, CHRISSIKOPOULOS V. Modeling security in cyber-physical systems[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2012, 5(3-4): 118-126.
- [44] ZONOUZ S, DACIS 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.
- [45] 蒋长江, 刘俊勇, 刘友波, 等. 基于广域测量系统和 CELL 理论的强迫振荡在线感知与定位[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 125-132.
- JIANG Changjiang, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Online forced oscillation detection and identification based on wide area measurement system and CELL theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 125-132.
- [46] KOUBAA Z A, ANDERSSON B. A vision of cyber physical Internet[C]//Proceedings of the Workshop of Real-time Networks (RTN'09). Dublin, Ireland: [s.n.], 2009: 1-6.
- [47] LEE J, BOHACEK S, HESPANHA J, et al. Modeling communication networks with hybrid systems[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(3): 630-643.
- [48] LIU Y, PRESTI F L, MISRA V, et al. Fluid models and solutions for large-scale IP networks[J]. ACM Sigmetrics Performance Evaluation Review, 2003, 31(1): 91-101.
- [49] FARRELL S, CAHILL V. Delay-and disruption-tolerant networking [J]. IEEE Internet Computing, 2009, 13(6): 82-87.
- [50] MARTINS E C, JOTA F G. Design of networked control systems with explicit compensation for time-delay variations[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C, 2010, 40(3): 308-318.

作者简介:



张勇军

张勇军(1973—),男,广东河源人,教授,博士研究生导师,博士,从事能源互联网、主动配电网、无功电压控制、可靠性与规划等研究工作(E-mail: zhangjun@scut.edu.cn);

陈泽兴(1992—),男,广东汕头人,博士研究生,研究方向为能源互联网、电网无功电压控制(E-mail: 690726374@qq.com);

蔡泽祥(1960—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,从事能源互联网、电力系统继电保护等研究工作(E-mail: epzxcai@scut.edu.cn)。

(下转第16页 continued on page 16)

- ZHANG Pengfei,XUE Yusheng,ZHANG Qiping. Power system time-varying oscillation analysis with wavelet ridge algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(16):32-35.
- [21] 李素洁,吴亚锋,裴焱. 小波模态参数辨识的边缘效应问题研究 [J]. 噪声与振动控制,2009,29(2):93-96.
- LI Sujie,WU Yafeng,QU Yan. Investigation on edge-effect of modal parameter identification using wavelet transform[J]. Noise and Vibration Control,2009,29(2):93-96.
- [22] 袁礼海,宋建社. 小波变换中的信号边界延拓方法研究[J]. 计算机应用研究,2006,23(3):25-27.
- YUAN Lihai,SONG Jianshe. Research on signal extended methods in wavelet transform[J]. Application Research of Computers,2006,23(3):25-27.
- [23] 胡国胜. 支持向量机及在电力系统中的应用[J]. 高电压技术,2007,33(4):101-105.
- HU Guosheng. Study on support vector machines algorithm and its application to power system[J]. High Voltage Engineering,2007,33(4):101-105.
- [24] JIANG T,JIA H,ZHAO J,et al. Mode matching pursuit for

estimating dominant modes in bulk power grid[J]. Generation, Transmission & Distribution,2014,8(10):1677-1686.

作者简介:



李国庆

李国庆(1963—),男,吉林长春人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统安全性和稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化(E-mail:lgq@nedu.edu.cn);

王丹(1989—),女,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为电力系统安全性与稳定性(E-mail:860692656@qq.com);

姜涛(1983—),男,湖北随州人,副教授,博士,通信作者,研究方向为电力系统安全性和稳定性、可再生能源集成、综合能源系统(E-mail:electricpowersys@163.com);

陈厚合(1978—),男,江苏徐州人,副教授,博士,研究方向为电力系统安全性和稳定性(E-mail:chenhouhe@126.com)。

Power system oscillation mode identification based on recursive continuous wavelet transform

LI Guoqing,WANG Dan,JIANG Tao,CHEN Houhe

(School of Electrical Engineering,Northeast China Dianli University,Jilin 132012,China)

Abstract: A method of low-frequency oscillation mode identification based on the recursive continuous wavelet transform is proposed for power system. The fundamental principles of wavelet coefficient selection for the oscillation mode identification of power system are discussed. The least squares support vector machine is applied to fit and extent both ends of signal data for eliminating the inherit edge effect of wavelet transform and improving the accuracy of wavelet identification. The wavelet identification is combined with the recursive least squares to recursively update the oscillation frequency and damping ratio for the dynamic tracking of modal parameters of power system. The simulative data of IEEE 68-bus system and the measured data of China Southern Power Grid verify the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: electric power systems; low-frequency oscillation; continuous wavelet transform; edge effect; least squares support vector machine; recursive least squares

(上接第7页 continued from page 7)

New generation of cyber-energy system:Energy Internet

ZHANG Yongjun,CHEN Zexing,CAI Zexiang,LI Licheng,SONG Weiwei

(Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology,School of Electric Power, South China University of Technology,Guangzhou 510640,China)

Abstract: "Internet plus" is gradually penetrating into the energy industry and driving the in-depth combination of smart grid and energy-net. The morphological characteristics of CES(Cyber-Energy System) built by the Energy Internet are analyzed under the background of this combination in three aspects:the stochastic dynamic characteristics of multi-coupling energy flow,the information integration capability of wide-area Internet and the interactive characteristics of energy-information flow. Three core techniques,i.e. CES modelling,systemic analysis method and control method,are discussed to outline the development of CES in smart grid. The developmental challenges of related core techniques in the new generation of CES are proposed.

Key words: cyber-energy system; Energy Internet; Internet plus; technical challenge