

智能电网CPS及其关键技术

文/天津大学电气与自动化工程学院 袁 博

天津大学教育学院 王 莹

随着智能电网建设深入,电力信息系统日渐成为支撑智能电网的重要“神经系统”,未充分融合信息系统的传统电力系统架构显然已不能适应智能电网发展需求,然而单纯引入信息系统将导致一次系统和信息系统在运行、分析和控制上的相互割裂,无法实现分布式电源全局优化调度和用户满意度等需求。为此,构建实现信息系统与传统电力系统深度协作的新型智能电网架构是实现电网智能化的关键。

近年来提出的信息物理融合系统(cyber physical system, CPS),将信息系统和物理系统深度融合,为信息系统真正意义上融入智能电网提供了一种新思路。CPS更加注重系统资源合理分配和系统性能高效优化,充分满足了与用户满意度的需求。构造智能电网CPS作为未来智能电网的基本架构已成为智能电网的发展趋势。

构建智能电网CPS的必要性

以一次设备和二次设备为主要方面的传统电力系统建设未充分考虑互联各电力设备的信息系统,但随着智能电网建设的深入,这种现状已不能满足智能电网的需求。但简单地引入信息系统前沿技术对实现智能电网需求是不够的:①基于传统电网的

分析控制方法没有充分考虑信息系统的影响。而智能电网中系统优化控制高度依赖通信网络,信息系统对于电网本身的影响不可忽略。②现有信息系统的分析控制方法均未计及电力系统本身影响,智能电网信息系统以电力系统实体为依托,信息系统必与电力系统本身密切相关。

可见,单纯引入信息系统的电力系统架构存在一次系统和信息系统的相互割裂。因此,引入新的传感、计算和通信技术,构建信息和物理系统深度融合的智能电网CPS作为未来电网基本架构,成为必然趋势。具体而言,其构建具有以下必要性。

1) 智能电网实现大量分布式电源、储能装置和电动汽车等可再生能源的并网控制和优化调度。对分布式电源的优化调度,迫切要求信息系统具有对物理设备的全局优化和深度交互功能,并且需要充分计及信息系统对电力系统的影响。CPS的深度融合性正能够实现,传统电力系统架构无法实现的全局最优控制和信息、物理系统间的深度交互。

2) 智能电网CPS克服了电力系统和电力信息系统的割裂,计及两个系统的相互影响,更符合智能电网的提升用户侧互动参与和电力系统运营效率等要求。

3) CPS是继Internet和物联网之后一项革命性技术,构建服务于人类的大型CPS是未来趋势,而智能电网CPS作为大型CPS的一个子系统,其构建也应同步进行。

智能电网CPS功能定位

1. CPS概述

由于CPS提出时间不长,目前尚未形成统一定义。Lee提出CPS是许多计算过程和物理过程的紧密集成,通过计算组件和通信网络监制物理实体。Baheti等认为CPS是紧密融合计算组件与物理组件,并能够实现动态影响和相互协调的高可靠性系统。还有文献则认为CPS是在充分感知环境基础上,将计算、通信和控制能力深度融合的网络化物理设备系统,实现了信息世界和物理世界的完全融合。

本文结合现有各种CPS概念,认为CPS是信息资源和物理资源紧密融合而形成的能够实现虚拟世界和实际物理世界深度交互与协同的下一代智能系统。具体地讲,CPS是将计算能力、通信能力、感知能力和自治控制能力四者嵌入到物理设备和整个CPS系统中,这四种能力进行内部以及与物理系统之间的深度整合,在对物理环境进行分布式深度感知的基础上,通过可靠数据通信和计

算处理，为物理系统提供动态自治控制服务，最终实现物理系统尚不具备的自治性、高效性、可靠性和灵活性。

2. 智能电网CPS的功能定位

智能电网引入CPS的核心目的是实现电力信息系统与电力物理系统的深度融合，克服两者相互孤立的现状。结合CPS特点，智能电网CPS的主要功能可定位为：

1) 具有智能电网所要求的各种功能包括可靠性、自愈性、互动性以及支持用户侧参与等功能。需要强调的是，支持分布式电源的整体优化调度是智能电网CPS功能的重中之中。

2) 具有对大规模电网中所有物理实体统一控制和整个系统全局优化的功能。当前电力系统对物理实体控制灵活性较差，通常仅控制大型发电机组和输配电网，其他大量物理设备难以实现系统全局协调和最优控制。构建智能电网CPS的主要目的是大幅度提升系统对物理实体的控制能力，最大化提升系统的整体运行效率。

3) 具有智能电网物理实体系统和电力信息系统的实时监控和交互式综合计算。

4) 实现智能电力物理系统和信息系统间的无缝集成。将两者作为一个整体进行同时感知、综合计算和整体控制。

5) 智能电网CPS是未来构建的全局CPS的一个子系统。作为子系统，智能电网CPS必须实现与其他CPS子系统的信息流动、共享和协作。

智能电网CPS体系架构

1. 智能电网CPS体系架构

体系架构是实现智能电网CPS的首要问题，有文献指出CPS的抽象结构是将物理系统和信息系统视为两个具有大量节点的深度交互网络。还有文献则给出了实现CPS的一种体系架构。本文在此基础上，结合智能电网特征，构造一个智能电网CPS基本实现架构，如图1所示。

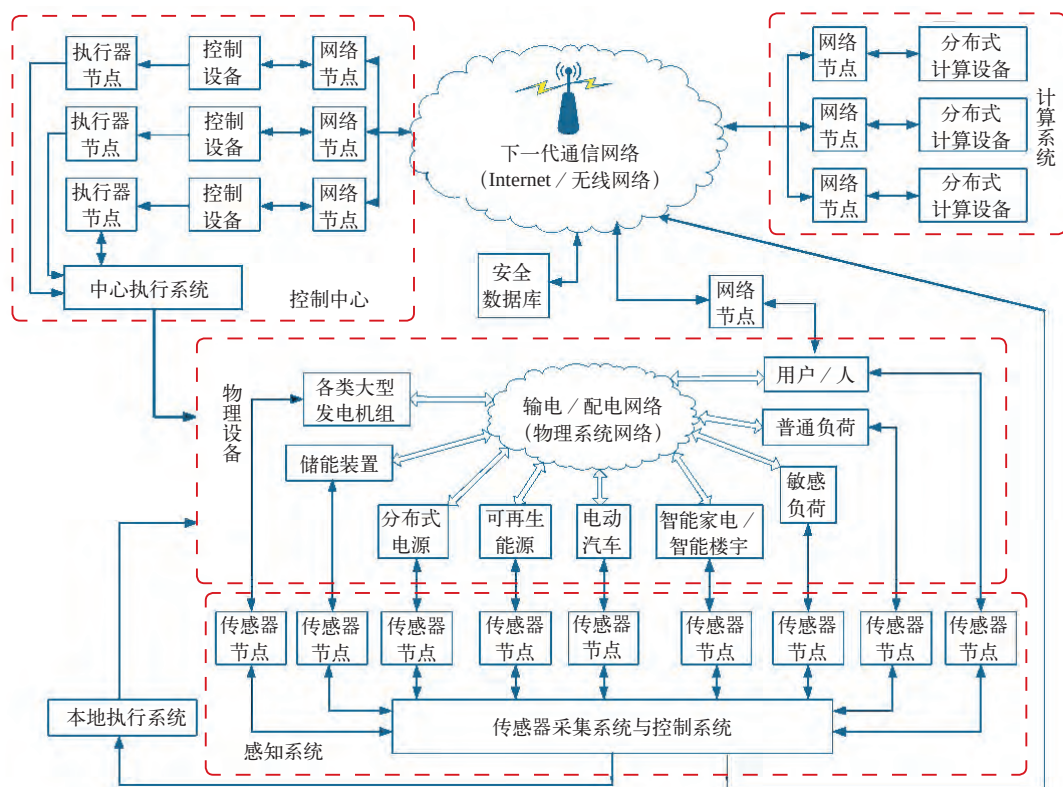


图1 智能电网CPS体系架构

从图中可以看出，智能电网CPS主要由感知系统（传感设备）、计算系统（计算设备）、控制中心（控制设备/执行器）、物理设备和CPS网络5部分组成，

所有信息设备和物理设备通过两个大型CPS网络互连。图中的空心箭头和单线箭头分别表示智能电网CPS中的电能流动和信息流动，其中双向的箭头表示信息流或电

能流是双向流动的。

(1) 物理设备

物理设备是物理系统中的主要部分，主要指智能电网中的各种电源、负荷等电力设备，包

括：大型发电机组、分布式电源、储能装置以及电动汽车、智能家电等各类负荷。物理设备中存在很多具有能量双向流动性和供电可中断性的负荷（如电动汽车、小型微网等），这也是智能电网相需要强大的信息系统支撑的原因之一。

智能电网CPS中的各种分布式电源和负荷等物理设备未来都需要通过内嵌传感设备和网络实现与控制中心的信息交互，因此需要为智能电网CPS中的每个物理设备分配一个不冲突的网络地址以及CPS的专用通信协议。

（2）感知系统、计算系统和控制中心

CPS的感知系统由大量传感器节点以内嵌于物理实体方式组成，计算设备则兼有内嵌于物理实体方式和集中配置方式。感知、计算设备的内嵌方式有效提升了信息系统和物理系统的深度融合，但内嵌式小型计算设备远不能满足智能电网CPS所要求的计算能力，可考虑引入云计算等大规模分布式计算技术。

控制中心由大量的控制设备和执行器组成，类似于目前电力系统调度中心，主要负责整理采集信息和仿真分析信息，并制定控制策略。控制设备或内嵌于物理实体，或集中存在于CPS中。

（3）智能电网CPS网络

智能电网CPS中有两个大型网络实现所有物理设备和信息设备的互联，分别是智能电网CPS通信网络和输/配电网络。

智能电网CPS的通信网络负责连接各信息设备，其中的信息交互主要为信息流，未来的CPS通信网络主要有目前的电力系统专用网络、Internet有线网络、无线网络以及下一代通信网络等类型。

智能电网CPS的输电/配电网络是传统电力系统供电网络，连接电力系统物理设备，主要负责电能流的传输。

2. 智能电网CPS分层结构

上述提出的智能电网CPS体系架构重点强调了智能电网CPS的实现和物理构造，对前期构建CPS的物理实现至关重要。但随着智能电网CPS建设的深入，必将更加注重所构建系统的服务质量，因此本文对一种面向服务的智能电网CPS分层结构做了阐述。

有文献中提出，面向服务的CPS分层结构可分为节点层、网络层、资源层和服务层的四层结构，本文在四层结构的基础上，结合智能电网特点，提出面向服务的智能电网CPS分层结构为六层结构，如图2所示。

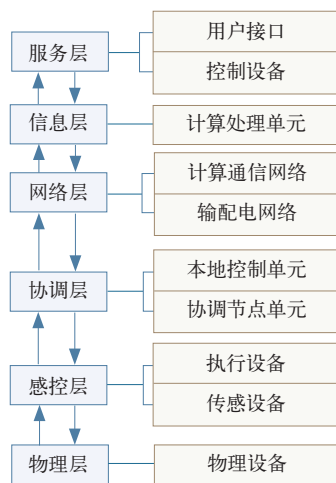


图2 智能电网CPS分层结构

1) 物理层。主要是智能电网中的电力设备，是感知和执行的对象。

2) 感控层。由传感设备和执行设备组成，直接作用于电力设备，向上采集感知信息、向下发送控制信息。

3) 协调层。由于感控层节点众多、采集数据量巨大，因此需在感控层和网络层之间设置协调层，该层具有一定信息处理能力，实现优化上传数据、信息初步判断与本地执行、协调感控层内节点等功能。

4) 网络层。由下一代通信网络和电力输配电网络组成。

5) 信息层。系统中的强大计算资源信息整合与存储资源，实现对采集信息的计算分析和信息资源的整合，又称为资源层。

6) 服务层。将整个智能电网CPS包装成服务对外提供给用户，为用户提供操作接口。

智能电网CPS关键技术

1. CPS通信协议

CPS的信息系统中深度融合了物理系统，传统的通信协议已不再适用于智能电网CPS的通信协议，这就需要为智能电网CPS构造专门的网络通信协议。相关学者结合物理系统嵌入式控制的特点，提出了信息物理互联网（Cyber Physical Interne, CPI）的六层协议栈，作为CPS通信协议的网络参考模型。CPI的协议栈借鉴TCP/IP协议栈，在传统五层体系结构基础上，针对CPS特点增加信息物理层（Cyber Physical Layer, CP-Layer）实现物理系统特征的准确描述，如图3所示。其他层可根据信息物理层实时调整，有效支持跨层设计和实时泛在控制。

目前CPS的通信协议仍存在许多技术问题，主要集中在通信系统中融合物理系统出现的新问题：①物理的设备网络地址分配；②物理设备状态的数据格式定义；③性质完全不同的物理设备间的信息综合处理；④所有计算设备时间同步等。

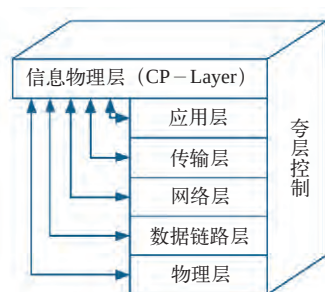


图3 CPI协议栈

2. 智能电网CPS综合仿真技术

智能电网CPS综合仿真分析是分析感知信息并实现CPS最优控制的重要工具，应充分计及信息系统与物理系统相互影响。目前，智能电网CPS综合仿真分析包括信息和物理两个层面的分析。

1) 信息层面上的综合仿真分析，以分析信息系统状态为目的，并且以分析信息系统对电力系统的影响为重点。

2) 物理层面上的综合仿真分析，以分析电力系统自身状态为目的，并以分析物理系统对信息系统的影响及判断物理系统安全稳定运行行为重点。

3. 混合控制最优协调技术

智能电网CPS以实现物理系统的全局优化控制为主要目的，但未来智能电网中控制设备数量呈爆炸式增长，完全采取集中控制方式实时性难以保证。当前环境下构建的智能电网CPS，宜采取全局控制和本地局部控制相结合的混合控制方式，而物理设备的内嵌控制设备为混合控制提供了条件。

混合控制方式最关键的问题在于如何在全局控制与本地控制之间进行最优协调以实现控制方式最优化。混合控制最优协调常以运行成本最小、社会效益最高等为目标函数，同时受电力信息系统和物理系统的性能约束。通常利用信息系统组件越多，控制方案愈好，但这又对实时性产生挑战。此外，智能电

网CPS建设必然在现有电力系统基础之上，因此混合控制最优协调技术应充分考虑实际环境，能够在多种控制之间灵活切换。

4. 智能电网CPS实时性保证技术

CPS对实时性要求很高，保证实时性能够为全局最优控制提供条件，是智能电网CPS的重要技术。影响实时性的问题主要是网络传输时延和信息处理时延，其中处理时延可通过大规模并行计算等技术解决，而CPS中传输时延较为复杂，主要体现在双向传输时延，并伴随时延抖动。因此，保证实时性可先从3个方面入手。

1) 信息传输过程优化。优化传输过程来减少传输时延是当前保证实时性的主要方法。CPS学术界试图采取以信息为中心的方式，开发网络化的实时嵌入式数据库以提取事件信息，该数据库节点可对提取信息进行交互得到系统状态，采用数据库节点代理方式避免泛红方式的时延。

2) 传输抖动时延优化。Al-Omari. H等提出通过采用Play-back缓存方式将抖动时延转化为固定时延，并\利用控制器精确预测Play-back时延以减少异常峰值出现，从而实现降低抖动时延。

3) 优化节点布置。将系统中大量传感器节点和执行器节点依据实际环境优化布置，需要大量数据交互的节点尽量靠近，同时还可根据实际环境的约束将节点布置问题转化为规划问题以产生最优方案。

5. 智能电网CPS安全与可靠性技术

除了考虑传统电力系统和信息系统的可靠性与安全性外，智能电网CPS的可靠性与安全性技术还应重点考虑两个系统的影响，即信息系统故障和隐患对电力系统可靠性和安全性的影响。通常情况下，信息系统故障对电力系统本身运行影响较大，分析信息系统故障对电力系统可靠性和安全

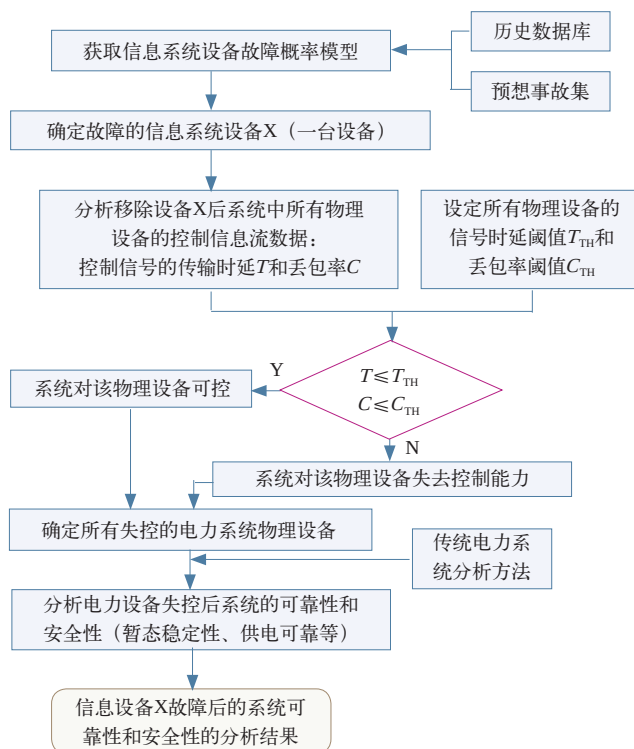


图4 智能电网CPS安全性与可靠性分析方法

性的影响是一项重要基础技术，下面介绍一种信息设备故障时智能电网CPS安全性与可靠性分析方法，如图4所示。

目前在CPS安全性和可靠性提升方面以引进传统信息系统中相关技术为主，还有待进一步研究。可以通过建立预防、检测、防御性修复和攻击性修复四个层面的CPS安全机制保证系统的安全与隐私；而采用现有网络抗毁性技术、系统实时预警修复技术等则可以提升系统的可靠性。

6. 智能电网CPS的设计与规划技术

针对电力系统特点研究智能电网CPS的设计与规划方法关系到系统的具体实现，本文认为有以下几个方面。

1) 系统设计重点考虑如何将信息系统和物理系统深度融合，对当前研究而言，应首先考虑如何把感知、计算、通信和控制设备合理嵌入到物理设备中生产出新一代CPS组件。

2) 未来智能电网CPS规划必须把电力系统和信息系统统一起来进行规划，重点研究在现有电力系统基础上，信息设备的布置

对电力物理系统影响的问题。

结论与展望

当前电力系统架构存在电力一次系统和电力信息系在优化控制方法上的相互割裂，难以实现未来智能电网的分布式电源全局优化和用户侧参与等需求。构建智能电网CPS作为未来智能电网的基本架构已成为趋势，本文结合CPS现状和智能电网特点，在阐述智能电网CPS的构建必要性和功能定位基础上，深入研究了智能电网CPS构建的体系架构和实现的关键技术，为相关工作深入提供参考。

目前构建智能电网CPS尚处于探索阶段，仍存在许多技术挑战。本文认为未来有以下方面需重点研究：

1. 智能电网CPS的标准化

目前全球范围内的CPS标准化研究刚刚起步，CPS领域尚没有统一的国际标准。智能电网CPS是整体CPS的一个子系统，必须遵循在物理设备、通信协议、编程语言、软硬件接口等方面相应的统一行业标准。随着CPS行业标准的深入研究，智能电网CPS的标准化

问题也应同步跟进，为CPS的实现提供依据。

2. CPS的组件抽象

CPS的组件抽象问题是实现信息系统与物理系统融合的主要方式之一，目前在这方面的研究空白较大，主要存在：不同平台和应用场景技术特点的统一、混合交互过程解耦、融合物理设备建模等难题。

3. 关键技术中存在的难题

关键技术中仍存在的诸多技术问题也是未来的研究重点。

在系统综合仿真方面，未来应以实现信息、物理系统深度融合仿真为主要方向。目前仿真虽通过计及信息、物理系统相互影响的方式实现两者融合，但仍以传统分析方法为主，未来应将传统分析方法进一步融合以实现真正意义上的综合分析。

在CPS通信协议方面，有关物理设备地址和数据格式的问题尚未解决。实际系统中设备数量庞大，如何有效实现通信地址分配是未来要考虑的重要方向之一。

此外，如何进一步保证CPS的实时性以及如何保证CPS的安全性等问题仍需进一步研究。EA