

# 配电网信息物理系统协同控制架构探讨

李培恺<sup>1</sup>, 曹勇<sup>1</sup>, 辛焕海<sup>1</sup>, 戴攀<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 信息物理系统(CPS)通过对计算、通信和控制技术的有机整合与协调,促进了电力系统运行方式的转变,并为其“智能化”的建设提供了途径。作为电力 CPS 的重要组成部分,配电网 CPS 须在未来大规模异构分布式新能源接入的条件下仍具有良好的实时控制及优化调度能力。在此背景下,对配电网 CPS 的控制架构进行了研究。结合 CPS 的组成要素和关键功能,提出了一种包含主动配电网及微电网技术在内的配电网 CPS 框架结构;在此基础上,针对配电网 CPS 的协同控制策略及其多层次、分布式耦合的特征,提出了包含感知通信、计算以及物理对象的分布式实体控制架构,以及兼具内部统一特性与外部互联特性的层次化抽象控制架构,从而构成完整的配电网 CPS 协同控制架构。

**关键词:** 信息物理系统; 配电网信息物理系统; 控制架构; 协同控制; 分布式

**中图分类号:** TM 76

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.001

## 0 引言

在当今能源多样化和可持续发展观念的推动下,电力系统正在发生深刻的变革。智能电网的研发成为了学术界和电力工业界共同关注的焦点,并已在部分国家进入前期发展或工程示范阶段。推进智能电网发展的主要动力在于促进大规模分布式可再生能源、电动汽车等新型负荷和各种储能设备的并网协调调度,优化电力市场管理运营方式,以及鼓励用户侧广泛、深入的参与<sup>[1]</sup>。这将使得电力系统从电源跟踪负荷变化进行调整的传统运行模式向“源-网-荷”柔性互动的新型运行模式进行转变<sup>[2]</sup>。为了实现上述目标,需首先实现信息在电力系统内的双向流动和有效利用,并在此基础上提升对物理系统的感知和控制能力,从而保证电网能够灵活、高效、可持续、高可靠性以及高安全性地运行<sup>[3]</sup>。信息物理系统 CPS(Cyber-Physical System)的提出为这一问题的解决提供了有效的途径。

CPS 高度融合了信息、通信与控制技术,在现有产业调整、生产智能化以及未来能源结构优化等方面具有重要的意义。作为 CPS 工程应用的一个重要分支,电力 CPS 改变了传统电网的规划以及控制方式,为电力系统与信息、通信技术的深度结合提供了途径。在研究内容上,文献[4-6]对于电力 CPS 的混合建模理论进行了探讨;文献[7-12]研究了信息系统与物理系统交互作用后系统整体的安全性能问

题;文献[13-14]从故障检测与评估的角度展开研究;文献[15-17]对电力 CPS 的仿真实现方法与挑战进行了初步探讨。目前,电力 CPS 的相关研究工作大多以主网 CPS 为研究对象,少有基于配电网的研究。考虑到配电网以向电力用户供电为主要功能,以安全、经济运行为主要运行指标的不同特点,尚需对配电网 CPS 进行探讨。

如今,分布式新能源机组正逐渐大规模地接入配电网侧,其地理分布的分散性以及发电的间歇性特性改变了传统配电网中功率单向流动的特点;加之新能源种类多、性能不一致,使得整个配电网的拓扑结构和动态特性变得十分复杂。网络动态新特性的不断出现,给配电网 CPS 的实时控制和优化调度带来了新的挑战。为了妥善解决这一问题,须对配电网 CPS 的控制架构进行研究,建立电力信息层和物理层的耦合联系,从而为配电网侧电能的统筹管理提供条件。在架构的控制模式选取上,协同控制方式凭借其仅依靠局部信息交换即能使分布式终端自适应地实现控制目标的特性,以及对通信故障鲁棒等优点,相较于集中控制方式更适用于物理环境分散且复杂的配电网 CPS 之中,具有更广阔的应用前景。

基于上述背景,本文根据 CPS 框架结构的组成要素及关键功能,设计了一种充分结合主动配电网以及微电网技术的配电网 CPS 框架结构。并在此基础上,提出了配电网 CPS 协同控制架构:一方面,在实体架构的设计上采用多时间尺度优化调度的方式,结合全局优化与区域自治的模式对配电网侧异构新能源机组进行分布式协调控制;另一方面,在抽象架构的设计上则充分考虑了配电网 CPS 的内部统一特性与外部互联特性,采用层次型架构对资源对

收稿日期:2017-03-17;修回日期:2017-10-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015-AA050202);国家电网公司科技项目(52110417000B)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA-050202) and the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(52110417000B)

象进行协调管理。

## 1 配电网 CPS 及新能源协同控制方式概述

### 1.1 配电网 CPS

CPS 强调了嵌入式计算机和网络监控技术与物理过程的相互作用<sup>[8]</sup>,其核心在于通过 3C(Computing, Communicating, Control)技术的有机整合与协调,完成对复杂物理过程的高度感知与实时调控,最终实现生产、生活的智能化。从本质上而言,CPS 是一个开放的控制系统,它将广域、分散、异构的子系统进行整体互联,并为大系统的安全、可靠、高效运行和实时操作提供了保障,因此具有极为广泛的应用前景。

配电网 CPS 是 CPS 技术与智能电网的有机结合体,因此除了具有支持分布式电源接入以及促进用户侧参与等运行特征之外,配电网 CPS 还拥有了信息的共享和协作能力。由于智能电网的“智能化”属性必须依靠先进的信息、通信技术才能够实现,因此配电网 CPS 是智能电网不断发展的结果<sup>[19]</sup>。配电网 CPS 借助于信息系统对于分布式终端信息的及时获取、传输和处理,实现配电系统对于多源异构分布式电源的高效利用,这也为当前配电网侧电能的协调控制研究提供了新的思路。

### 1.2 新能源的协同控制方式

在分布式新能源机组的协同控制方式中,上级控制中心只需与一小部分电源终端之间建立通信联系,下层各电源终端依靠局部通信网络完成信息的传递,实现控制策略,其控制结构如图 1 所示。协同控制的目标是在满足上级控制中心下发的功率调度指令的前提下,分布式地实现新能源机组之间出力的最优分配。具体地,在满足总有功出力目标的前提下,文献[12,20-21]通过协调各新能源机组的实际出力使之与各自最大允许出力的比值相同,实现有功出力的公平分配;文献[22-24]则通过协调各新能源机组的发电成本微增率使其趋于一致,从而实现发电总成本的最小化。

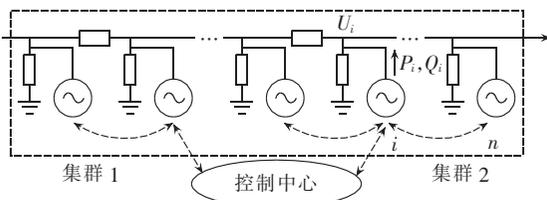


图 1 协同控制方式控制结构

Fig.1 Control structure of cooperative control mode

## 2 配电网 CPS 框架结构

### 2.1 CPS 框架结构综述

近年来,众多国内外研究学者从顶层架构出发,提出了形式多样的 CPS 框架结构,旨在指导 CPS 的设计。但由于目前对于 CPS 的认识和研究尚不成

熟,因此仍然没能够制定一个统一标准化的 CPS 框架结构以适用于各领域。现阶段所提出的这些框架结构均可划分为实体结构和抽象结构 2 类,具体的内容又各有不同。

一方面,在对 CPS 实体结构的研究工作上,文献[25]率先提出了 CPS 的原始框架,并给出了信息层与物理层的交互方式和流程,为后续的研究工作奠定了基础;文献[26]从 CPS 物理实体实现的角度提出了一种 CPS 框架;文献[27]提出了一种注重物理层与信息层交互的 CPS 框架,特别强调了 CPS 对于实时性的要求;文献[28]从物理分层的方面进行考虑,提出了一种实用性较强的层次化架构,充分体现了 CPS 的性能需求,极大地方便了用户对于 CPS 服务的享用。

另一方面,在对 CPS 抽象结构的研究工作上,基于文献[25]的两层 CPS 架构体系,文献[29]将控制层和服务层进行解耦,重新定义了一个基于服务的三层 CPS 抽象架构,该架构具有服务上的通用性、适应性以及正确处理功能上变化特性的优势,但是并未给出其框架的补充细节;对此,文献[30]提出了框架重构以及租用协议,解决了因为资源被占用而引起的关键安全应用失效的问题。此外,文献[28]提出了一种更具有实际意义的三层抽象架构,该架构将应用层作为与用户的接口,通过网络层的传输和处理最终作用于物理层;文献[31]则基于环境感知提出一种 CPS 安全框架体系;文献[32-33]结合面向服务的体系结构提出了各自的四层和五层 CPS 架构;文献[34]增设一个信息物理层的构想,有效结合了 CPS 与环境的交互特性,具有指导意义。

在 CPS 与电力系统融合架构方面,文献[35]将 CPS 技术引入智能电网中,考虑了信息流和电能流融合的特点,初步建立了电力 CPS 架构,能够在一定程度上满足智能电网未来的建设需求;文献[36]建立了微电网范围内的 CPS 架构,并对其架构组成中的实体结构和抽象结构均进行了说明,为未来微电网 CPS 接入整体电力 CPS 提供了条件。

### 2.2 配电网 CPS 框架结构

基于上述 CPS 框架结构的组成要素及关键功能,本文提出一种在电力 CPS 整体互联环境下的配电网 CPS 框架结构,如图 2 所示。该结构融合了近年来主动配电网的研究成果,并同时 will 现阶段发展较快的微电网技术考虑在内,为后续协同控制架构的设计准备了条件。

该框架结构主要由以下 5 个部分组成。

a. 信息中心。用于储存 CPS 中的数据,并能为分布式计算平台对历史数据的调用提供服务;同时还具有检查用户身份合法性、响应合法用户的数据

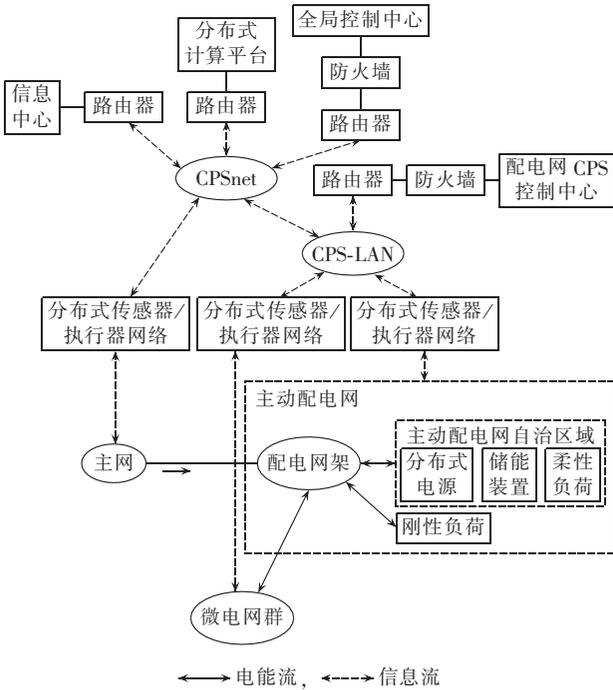


图 2 配电网 CPS 结构

Fig.2 Structure of cyber-physical distribution network system 查询和分析请求的功能<sup>[27]</sup>。

**b. 分布式计算平台。**在 CPS 大数据的环境下,传统的集中式计算设备无法承担庞大的计算量,需将大数据分析计算的任务分摊给所有联网的计算设备。新一代的分布式计算平台满足了 CPS 的这一计算需求,平台的搭建能够促使整个系统的数据处理能力和信息存储能力得到极大的提升。

**c. 通信网络,**包括 CPS 通信网络(CPSnet)和 CPS 局域网(CPS-LAN)。CPSnet 是下一代的互联网络,通过通信线路连接 CPS 上的其他组成部分,用于为整个系统提供实时服务。而 CPS-LAN 属于 CPSnet 的下层网络,用于电力 CPS 局部信息的通信和即时汇总,并上传至本地的局部控制中心进行即时处理。CPS-LAN 仍可以通过上层的 CPSnet 调用分布式计算平台和信息中心以及接受全局控制中心的管理。需要特别说明的是,由于本文重点关注于配电网侧的电能协调过程,因此只表示了配电网区域的 CPS-LAN。

**d. 控制中心,**包括全局控制中心和配电网 CPS 控制中心。一方面,全局控制中心位于整个电力 CPS 的上层,负责时刻分析 CPS 网络中的数据,检查数据是否达到使用或撤销某一控制策略的条件,并根据检查结果发送控制信息。对于用户的请求和命令,控制中心也需要实时响应和动作。在电力 CPS 中,该部分的作用与传统的电力系统调度中心类似<sup>[35]</sup>。另一方面,配电网 CPS 控制中心位于电力 CPS 的中间层,可视作配电网区域最上层的一个 CPS 主站,专门负责根据配电网的状态和预测信息以及全局控制

中心的管理信息制定局部的协调控制决策,并发布即时的控制指令,具体的控制管理机制将在第 3 节介绍。

**e. 电力实体。**电力实体主要是指配电网 CPS 中的配电一次系统,即包括主动配电网以及微电网群。所有电力实体部分均通过各自区域的分布式传感器/执行器网络与电力信息层建立联系。

### 3 配电网 CPS 协同控制架构

电力 CPS 技术顺利地将信息、通信技术以及先进的计算平台、控制设备等引入电力系统领域中,加速推进了智能电网的建设。作为这些设备互联的核心以及技术实施的载体,控制架构在电力系统的应用中有着重要的意义。但是目前对于配电网控制架构的大部分研究工作,仅考虑了配电网侧物理对象的分布性以及复杂性,也只重点对物理对象的控制问题进行了研究,尚缺乏对感知通信、计算以及物理环境等多层面复杂性以及各层面之间关联耦合性的综合考虑。因此,现阶段所提出的控制架构还不能够充分地满足对配电网 CPS 控制问题的需求。

基于上述背景,本文基于配电网 CPS 的协同控制策略及其多层次、分布式耦合特征,提出包含感知通信、计算以及物理对象的分布式实体架构并融入 CPS 内部统一特性与外部互联特性的层次化抽象架构,从而构成完整的配电网 CPS 协同控制架构。

#### 3.1 配电网 CPS 协同控制策略

对于配电网中每个新能源集群(如图 1 所示)而言,其内部的通信网络拓扑可用一个三元组 $(V, E, A)$ 表示,其中, $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 为节点(新能源机组)集合; $E \subseteq V \times V$ 为边(通信线路)集合,节点对 $(i, j) \in E$ 表示节点  $j$  能收到节点  $i$  所发出的信息,并定义输入邻居节点集合为 $N_i = \{j \in V | (j, i) \in E\}$ ;  $A \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为通信网络的邻接权重矩阵,其中的元素定义如下。

$$[A]_{ij} = \begin{cases} a_{ij} > 0 & (i, j) \in E \text{ 且 } i \neq j \\ 1 - \sum_{j \in N_i} a_{ij} & i = j \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

配电网 CPS 协同控制策略可用以下两层数学模型表示:

$$\begin{cases} \min F(I_p, I_F) \\ \text{s.t. } h^u(I_p, I_F) \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{S}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{S}(k) + \varepsilon\mathbf{B}(P_{\text{ref}} - P_{\text{out}}) \\ \text{s.t. } h^l(\mathbf{S}) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $I_p$ 为配电网 CPS 实际运行信息,包括配电网潮流和新能源机组出力状况信息等; $I_F$ 为配电网 CPS 预测数据信息,包括负荷预测和节点电价预测等;函数  $F$  为一个关于  $I_p$  和  $I_F$  的全局优化函数;函数  $h^u$  和

$h^l$  分别为上层和下层模型的约束条件;  $\varepsilon > 0$  为算法收敛因子;  $P_{\text{ref}}$  和  $P_{\text{out}}$  分别为上层下发的有功调度指令和受控新能源机组总出力;  $B \in \mathbf{R}^{N \times l}$  为 0-1 矩阵, 可接收反馈信息  $P_{\text{ref}} - P_{\text{out}}$  的节点所对应的矩阵  $B$  中的元素为 1, 其余为 0; 向量  $S$  包含了算法的协同变量, 通常为新能源机组发电成本微增率或者有功出力比例。式(2)通过邻近节点的信息交流以及分布式计算, 使得当  $k \rightarrow \infty$  时对于向量  $S$  中任意 2 个变量  $s_i$  和  $s_j$  都有  $|s_i(k) - s_j(k)| \rightarrow 0$ , 即最终可使各个协同变量逐渐趋于一致, 并同时满足调度目标  $P_{\text{ref}}$ 。

该策略的核心是利用全局优化与区域协同自治的配合完成分布式新能源机组的协调调度, 从而实现配电网 CPS 运行合理性及经济性最优。

### 3.2 配电网 CPS 实体分布式控制架构

依据上述协同控制策略, 现建立配电网 CPS 分布式控制架构以改善含高密度异构分布式新能源机组的配电网电能管理方式, 结构如图 3 所示。该架构建立在虚拟分区划分的基础上, 可实现各控制管理层之间多时间尺度的配合, 下文将对其进行详细说明。

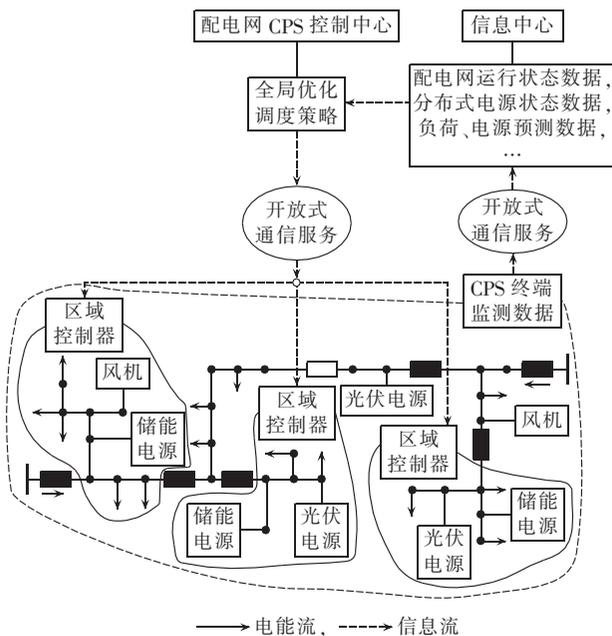


图 3 配电网 CPS 分布式控制架构

Fig.3 Distributed control architecture of cyber-physical distribution network system

#### (1) 虚拟分区。

在本文所采取的新能源协同控制方式下, 首先需要将与配电网连接的所有可控新能源机组按一定的原则进行分组, 形成虚拟分区, 并由各专门的区域控制器进行控制管理, 如图 3 中实线区域所示。所划分的虚拟分区是配电网 CPS 能量管理体系中实现负荷转移、最优控制运行等高级应用的最小电网物理实体区域, 也是响应全局优化控制目标指令的最小单元。参照主动配电网自治区域的划分方法<sup>[37]</sup>, 虚拟

分区的划分可以按照如下原则进行:

- 馈线上 2 个分段开关间隔内如果包含可控分布式新能源, 则其成为一个独立的虚拟分区;
- 馈线上从分支界定开关到线路末端如果包含可控分布式新能源, 则其成为一个独立的虚拟分区;
- 若馈线上某一区域包含较多的可控分布式新能源, 该区域可成为一个单独的虚拟分区。

按照上述原则划分的虚拟分区, 其分区范围不会受配电网联络开关状态及位置变化的影响, 因此能够适应配电网灵活多变的特点, 具有很高的实用性。

#### (2) 多时间尺度分布式协同控制。

本文新能源协同控制架构的控制管理按照多时间尺度的思想进行, 其执行机制如下。

a. 上层的配电网 CPS 控制中心根据配电网实时数据和预测数据信息以及配电网侧全局优化算法的计算结果, 制定新能源优化调度控制策略, 并将调度计划下发给各区域控制器。由于求解控制中所涉及的全局优化所需信息量较大, 且过程较为复杂, 因此该控制是在长时间尺度下完成的。

b. 下层的分布式新能源机组按照所划分的虚拟分区协同出力。同一虚拟分区内的新能源机组的电源 CPS 终端能够实现相互通信, 并且有一个或多个终端用以接收所在区域的区域控制器下发的调度指令。在各区域内部, 新能源机组群通过相互协调出力来满足该调度指令, 同时通过分布式算法实现区域内部电能分配的优化。在相邻 2 次上层下发控制调度指令值的时间间隔内, 各虚拟分区处于局部的自治控制模式, 因此该下层控制属于短时间尺度。

### 3.3 配电网 CPS 抽象分层控制架构

配电网 CPS 发展的趋势在于支持各类异构应用子系统的建设, 并成为实现跨行业互动的开放式的网络化基础设施, 最终形成一个在全球能源互联网体系下具有即插即用功能的模块。基于这一考量, 本文结合配电网 CPS 的运行特征, 提出与上述配电网 CPS 分布式实体架构相对应的六层抽象架构, 如图 4 所示。

a. 物理层。抽象架构的最底层, 主要包含配电系统中的储能设备、继电保护装置和分布式电源等设施以及负荷单元, 这些控制对象分布在配电网、主动配电网/微电网以及需求侧这 3 个层面上。为了适应现阶段物联网技术的发展, 本架构中所有的控制

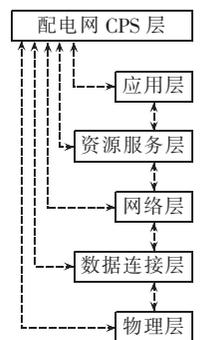


图 4 配电网 CPS 分层架构  
Fig.4 Hierarchy architecture of cyber-physical distribution network system

对象均通过设置 IP 信息来进行识别和分组,并进行联网。

**b. 数据连接层。**利用馈线终端设备(FTU)、开闭所终端设备(DTU)、远程终端单元(RTU)等配电网管控终端,通过与配电 SCADA 系统的交互,实现对物理层数据信息的搜集、初步处理以及传输等功能。该层包含传感器/执行器、汇集/控制节点以及通信线路等实体以及路由技术、传感器技术和嵌入式技术等诸多技术,其功能的实现需遵循数据协调的相关协议。

**c. 网络层。**配电网 CPS 分布式协同控制的信息通过开放式的通信网络进行传输,包括上行的配电网监测信息以及下行的配电网控制信息。该层包含网络连接、路由、数据传输、异构数据描述和语义解析等新技术,是 CPS 实现资源共享的基础。

**d. 资源服务层。**在大数据环境下将配电网 CPS 中的物理实体、信息流以及计算数据等统一描述为资源,并以资源查询、组织和维护的方式对其进行有效管理。进一步地,将 CPS 中资源能力进行抽象,并以服务为核心、通过事件/信息触发模式与相邻层次进行交流。

**e. 应用层。**该层根据下层传输的电网即时信息,可实现对配电网运行态势的监控和预测以及优化调度等功能。

**f. 配电网 CPS 层。**抽象架构的最顶层,在定义好相应通信协议以及资源描述方式的前提下,该层可与其余各层进行跨层互联以提供特定的服务支持。该层的另一设计重点是制定与外部 CPS 互联环境下的全局标准化协议,以适应 CPS 规模化、协同化发展的要求。未来电力 CPS 乃至更大范围 CPS 的整体开放式互联应用都将以顶层(CPS 层)的互联互通作为基础。

## 4 结论

配电网 CPS 在传统电力系统的基础上深度融合了通信、控制和分布式计算技术,为含高渗透率异构分布式新能源的电力系统全局能量的协调优化提供了可靠保障。配电网 CPS 将先进的计算平台和控制设备引入电力系统领域中,推进了智能配电网“智能化”的建设,在当前“工业 4.0”和“中国制造 2025”的时代背景下具有长远的发展前途。

本文在配电网 CPS 框架结构的基础上,结合电力系统的控制方式,提出一种配电网 CPS 协同控制的架构。该控制架构中融入了协同控制方法,能够对配电网侧接入的分布式电源、储能设备以及柔性负荷等进行能量协调管理;并增设了配电网 CPS 层,以促进 CPS 内部管理统一以及系统间的开放互联,

为未来 CPS 的规模化及协同化建设准备了条件。

作为一项新兴的跨领域结合技术,配电网 CPS 及其控制架构的建设与应用必将面临诸多挑战。相信随着研究的不断深入,CPS 技术必将在电力系统领域取得更大的突破。

## 参考文献:

- [1] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34):1-8.  
YU Yixin, LUAN Wenzheng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34):1-8.
- [2] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21):1-6, 12.  
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21):1-6, 12.
- [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] XIE L, ILIC M D. Module-based modeling of cyber-physical power systems[C]//International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Beijing, China:IEEE, 2008:513-518.
- [5] LI G, DU C L, SONG C, et al. Cyber-physical aware model based on IEC 61850 for advanced power grid[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China:IEEE, 2010:1-5.
- [6] 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.
- [7] AMIN S M. Electricity infrastructure security: toward reliable, resilient and secure cyber-physical power and energy systems[C]//Power and Energy Society General Meeting. Providence, RI, USA: IEEE, 2010:1-5.
- [8] MCMILLIN B. Complexities of information security in cyber-physical power systems[C]//Power Systems Conference and Exposition, 2009. Seattle, WA, USA:IEEE, 2009:1-2.
- [9] MO Y, KIM H J, BRANCIK K, et al. Cyber-physical security of a smart grid infrastructure[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 100(1):195-209.
- [10] ZONOUS 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.
- [11] 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.
- [12] LIU Y, XIN H, QU Z, et al. An attack-resilient cooperative control strategy of multiple distributed generators in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6):2923-2932.
- [13] ALLEN J D, LIU X, LOZANO I, et al. A cyber-physical approach to a wide-area actionable system for the power grid[C]//

- Military Communications Conference. Orlando,FL,USA;IEEE, 2012:1-6.
- [14] 王宇飞,高昆仑,赵婷,等. 基于改进攻击图的电力信息物理系统跨空间连锁故障危害评[J]. 中国电机工程学报,2016,36(6):1490-1499.  
WANG Yufei,GAO Kunlun,ZHAO Ting,et al. Assessing the harmfulness of cascading failures across space in electric cyber-physical system based on improved attack graph[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(6):1490-1499.
- [15] PALENSKY P,WIDL E,ELSHEIKH A. Simulating cyber-physical energy systems:challenges,tools and methods[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems,2013,44(3):318-326.
- [16] WAN Y,CAO J,ZHANG S,et al. An integrated cyber-physical simulation environment for smart grid applications[J]. Tsinghua Science and Technology,2014,19(2):133-143.
- [17] 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.
- [18] LEE E A. Cyber physical systems:design challenges[C]//2008 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-time Distributed Computing (ISORC). Orlando,FL,USA:IEEE, 2008:363-369.
- [19] 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.
- [20] XIN H,QU Z,SEUSS J,et al. A self-organizing strategy for power flow control of photovoltaic generators in a distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(3):1462-1473.
- [21] XIN H,LU Z,LIU Y,et al. A center-free control strategy for the coordination of multiple photovoltaic generators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(3):1262-1269.
- [22] YANG S,TAN S,XU J X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(4):4416-4426.
- [23] YANG Z,XIANG J,LI Y. Distributed consensus based supply-demand balance algorithm for economic dispatch problem in a smart grid with switching graph[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2017,64(2):1600-1610.
- [24] ZHANG Z,CHOW M Y. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(4):1761-1768.
- [25] TAN Y,GODDARD S,PÉREZ L C. A prototype architecture for cyber-physical systems[J]. Acm Sigbed Review,2008,5(1):1-2.
- [26] 许少伦,严正,张良,等. 信息物理融合系统的特性、架构及研究挑战[J]. 计算机应用,2013,33(增刊2):1-5,45.  
XU Shaolun,YAN Zheng,ZHANG Liang,et al. Cyber physical system:features,architecture,and research challenges[J]. Journal of Computer Applications,2013,33(Supplement 2):1-5,45.
- [27] 谭朋柳,舒坚,吴振华. 一种信息-物理融合系统体系结构[J]. 计算机研究与发展,2010,47(增刊2):312-316.  
TAN Pengliu,SHU Jian,WU Zhenhua. An architecture for cyber-physical systems[J]. Journal of Computer Research and Development,2010,47(Supplement 2):312-316.
- [28] 陈丽娜,王小乐,邓苏. CPS 体系结构设计[J]. 计算机科学,2011,38(5):295-300.  
CHEN Lina,WANG Xiaole,DENG Su. Cyber-physical system architecture design[J]. Computer Science,2011,38(5):295-300.
- [29] LA H J,KIM S D. A service-based approach to designing cyber physical systems[C]//2010 IEEE/ACIS 9th International Conference on Computer and Information Science(ICIS). Yamagata,Japan;IEEE,2010:895-900.
- [30] YU C,JING S,LI X. An architecture of cyber physical system based on service[C]//International Conference on Computer Science & Service System. Nanjing,China:IEEE,2012:1409-1412.
- [31] WANG E K,YE Y,XU X,et al. Security issues and challenges for cyber physical system[C]//Green Computing and Communications. Hangzhou,China;IEEE,2011:733-738.
- [32] 王小乐,陈丽娜,黄宏斌,等. 一种面向服务的 CPS 体系框架[J]. 计算机研究与发展,2010,47(增刊2):299-303.  
WANG Xiaole,CHEN Lina,HUANG Hongbin,et al. A service-oriented architecture framework of cyber-physical systems[J]. Journal of Computer Research and Development,2010,47(Supplement 2):299-303.
- [33] HU L,XIE N,KUANG Z,et al. Review of cyber-physical system architecture[C]//IEEE International Symposium on Object/component/service-oriented Real-time Distributed Computing Workshops. Shenzhen,China;IEEE,2012:25-30.
- [34] KOUBÂA A,ANDERSSON B. A vision of cyber-physical internet[C]//8th International Workshop on Real-time Networks. [S.l.]:IEEE,2009:1-6.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 刘东,陈云辉,黄玉辉,等. 主动配电网的分层能量管理与协调控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5500-5506.  
LIU Dong,CHEN Yunhui,HUANG Yuhui,et al. Hierarchical energy management and coordination control of active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(31):5500-5506.

#### 作者简介:



李培恺

李培恺(1992—),男,广西南宁人,硕士研究生,研究方向为主动配电网与微电网分布式协同控制、电力信息物理系统(**E-mail**: li\_peikai@zju.edu.cn);

曹勇(1992—),男,浙江嵊州人,硕士,研究方向为主动配电网与微电网分布式协同控制(**E-mail**:21410181@zju.edu.cn);

辛焕海(1981—),男,江西萍乡人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为交直流系统稳定分析与控制、主动配电网与微电网分布式协同控制等(**E-mail**:xinhh@zju.edu.cn)。

(下转第 15 页 continued on page 15)

## Hierarchical classification PLC routing algorithm combining static relay with dynamic relay in medium voltage distribution network

WANG Yan, XUE Chen, JIAO Yanjun

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

**Abstract:** In order to meet the high reliability and high real-time requirement of data transmission in medium voltage distribution network automation system, PLC (Power Line Communication) technology needs flexible and reliable network routing algorithm. Based on the analysis of structure characteristics of medium voltage distribution network, a hierarchical classification PLC routing algorithm combining static relay with dynamic relay is proposed. According to the topology of medium voltage distribution network, the PLC network is divided into three levels by static relay method, which can ensure the overall logical structure of the communication network conforming to the physical structure of the distribution network, and accelerate the networking process. An improved hierarchical search algorithm is used in each level to ensure the flexibility and reliability of networking. Simulative results show that the proposed algorithm can adapt to the network structure and the channel environment, and the routing optimization process takes the link quality and relay load balance into account. The proposed algorithm has low computational complexity and fast networking speed. By adjusting the weight parameters of the algorithm, it can meet the networking's different requirements of reliability and real-time.

**Key words:** smart grid; medium voltage distribution network; power line communication; routing algorithm; channel quality; load balancing

(上接第 7 页 continued from page 7)

## Discussion on cooperative control architecture of cyber-physical distribution network system

LI Peikai<sup>1</sup>, CAO Yong<sup>1</sup>, XIN Huanhai<sup>1</sup>, DAI Pan<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Economic Research Institute, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** With the organic integration and coordination of computing, communication and control technologies, CPS (Cyber-Physical System) has contributed to the change of power system operation mode and provided a new approach for its intelligent construction. As an important component of cyber-physical power system, the cyber-physical distribution network system must have the functions of real-time control and optimized dispatch when large-scaled distributed new energy resources are connected to the distribution network in the future. On this background, the control architecture of cyber-physical distribution network system is studied. Considering the components and key functions of CPS, the frame structure of cyber-physical distribution network system is designed including the active distribution network and micro-grid technologies. On this basis, aiming at the multi-level and distributed-coupled cooperative control strategy of cyber-physical distribution network system, a complete cooperative control architecture of cyber-physical distribution network system is built, including the distributed physical architecture with sensing, computation technologies and controlled objects and the hierarchy abstract architecture with the internal unity and external interconnectivity.

**Key words:** cyber-physical system; cyber-physical distribution network system; control architecture; cooperative control; distributed mode