第 53 卷 第 1 期
2020 年 1 月

中国电力
ELECTRIC POWER

Vol. 53, No. 1
Jan. 2020

配电信息物理系统分析与控制研究综述

李晓[1,2,3]，李满礼[1,2,3]，倪明[1,2,3]

(1. 南瑞集团有限公司（国网电力科学研究院有限公司），江苏 南京 211106；2. 国电南瑞科技股份有限公司，江苏 南京 211106；3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室，江苏 南京 211106)

摘 要：随着先进信息通信技术在配电网中的广泛应用，配电网信息侧和物理侧融合程度愈发增强，已具备信息物理系统的典型特征。从分析与自愈控制的角度，对配电信息物理系统（cyber physical distribution system, CPDS）研究现状进行分析和展望。在分析方面，从 CPDS 可靠性评估和风险评估两个方面进行总结分析。在自愈控制方面，对传统物理侧自愈控制以及信息物理协同的 CPDS 自愈控制进行综述，指出现有研究的进展和不足。最后，从两网融合背景下的 CPDS 架构、考虑分布式电源的 CPDS 安全分析、CPDS 混合通信网自愈机制以及 CPDS 自愈控制体系等 4 个角度，对 CPDS 未来研究方向进行展望。

关键词：配电网；信息物理系统；可靠性评估；风险评估；自愈控制

DOI：10.11930/j.issn.1004-9649.201912094

0 引言

信息物理系统（cyber physical system, CPS）是一个实时感知、信息处理与动态控制相互融合的多维异构复杂系统，其通过 3C（communication, computation, control）技术将通信网络、物理系统与分析计算系统融为一体。随着风电、光伏等分布式电源的大量接入以及先进的数据采集、通信和控制技术的广泛应用，现代配电网已逐渐向主动配电系统（active distribution system, ADS）过渡，以实现对电网运行状态的实时感知与对线路开关、分布式电源、储能及需求侧响应资源等电网可调度资源的灵活可控[1-2]。ADS 借助大规模的传感测量系统以及复杂的信息通信网络，实现感知、计算、通信与控制等技术的深度融合[3]，已具备典型的配电信息物理系统（cyber physical distribution system, CPDS）的技术特征[4]。

先进信息通信技术（information and communication technology, ICT）的广泛采用虽然大幅提升了 CPDS 主动感知与控制的能力，但信息侧与物理侧的高度耦合也会将信息侧安全风险传递到电力物理系统，增大系统运行风险[5]，甚至造成严重的跨空间连锁故障[6]。近年来已发生多起由恶意信息攻击导致的电力系统大停电事件，如 2015 年乌克兰大停电事件[7-9]、2019 年委内瑞拉大停电事件[10] 等，引起业内专家学者的广泛关注与重视。

CPDS 直接与用户侧相连，是一个复杂庞大的信息与物理深度融合的现代工业系统，其信息系统的可靠性也将直接或间接影响用户供电的可靠性以及供电的电能质量。目前，针对 CPDS 的研究主要集中在以下几个方面：一是从结构设计对 CPDS 的内容及功能进行阐述；二是对 CPDS 中信息物理交互影响机理进行分析以及对信息失效后果进行可靠性或风险评估；三是从 CPDS 安全控制的角度，对考虑信息系统影响的馈线自动化自愈控制过程进行研究。

鉴于上述研究背景，本文围绕分析与自愈控制两个核心对国内外 CPDS 研究现状进行系统性综述，并对未来研究方向进行展望。

1 CPDS 结构与功能

CPDS 是先进信息通信技术与主动配电系统的

收稿日期：2019-12-16。

基金项目：国家重点研发计划资助项目 (电网信息物理系统分析与控制的基础理论与方法，2017YFB0903000)；国家自然科学基金重点资助项目 (网络攻击下智能电网信息物理安全理论与主动防御技术研究，61833008)；国家电网公司总部科技项目 (针对网络攻击的电网信息物理系统协同运行态势感知与主动防御方法研究)。

深度融合，在物理层可实现分布式可再生能源的大量接入、电动汽车与储能等可控资源的协同调度以及灵活负荷在电力市场中的广泛参与；在信息层可实现信息的广泛感知、分析、共享和协作。

对 CPDS 架构与功能的设计是实现 CPDS 建模、分析、控制的基础。CPDS 结构包含物理侧和信息侧两部分，物理侧包括变压器、配电线路、隔离开关、断路器等传统一次设备和风机、光伏等新能源设备以及储能装置、电动汽车等设备等；而信息侧包括信息通信设备以及通信网采用的通信协议、软件、拓扑等[11]。根据文献 [3, 12-13]，主流的 CPDS 结构可分为应用层、通信层、终端层，如图 1 所示。应用层位于配电主站或子站中，实现配电 EMS、配电自动化、人机交互等高级应用功能。通信层包括骨干网和接入网两部分，骨干网连接配电主站与配电子站，多采用光纤同步数字体系（SDH）光通信技术或多业务传输平台（MSTP）环网结构，可靠性高；而接入网连接配电子站与各个配电终端，多采用以太网无源光网络（EPON）、工业以太网、电力载波、无线公网/专网通信等混合通信方式，可靠性与骨干网相比较差。终端层包含馈线、断路器、分段开关等电力一次设备元件，以及馈线智能远动终端（FRTU）、馈线保护装置等智能配电终端。

同时，随着国家电网公司“三型两网”建设战略目标的提出[14]，两网融合如何定义和开展得到专家学者的广泛关注。文献 [15-17] 对智能电网、泛在电力物联网与电力 CPS 的概念和联系做出阐释，提出了能源领域的信息物理社会系统（cyber-physical-social system in energy, CPSSE）的概念，指出考虑社会元素影响的电力 CPS 便是智能电网与泛在电力物联网的融合。CPDS 是两网融合的重要组成部分，在泛在物联的背景下，文献 [18-22] 从架构内容、安全防护、应用场景等角度对两网融合下的 CPDS 架构及功能做了一些初步的探索，但有待进一步丰富和完善。

2 CPDS 可靠性与风险评估

目前，针对 CPDS 分析的相关研究主要集中

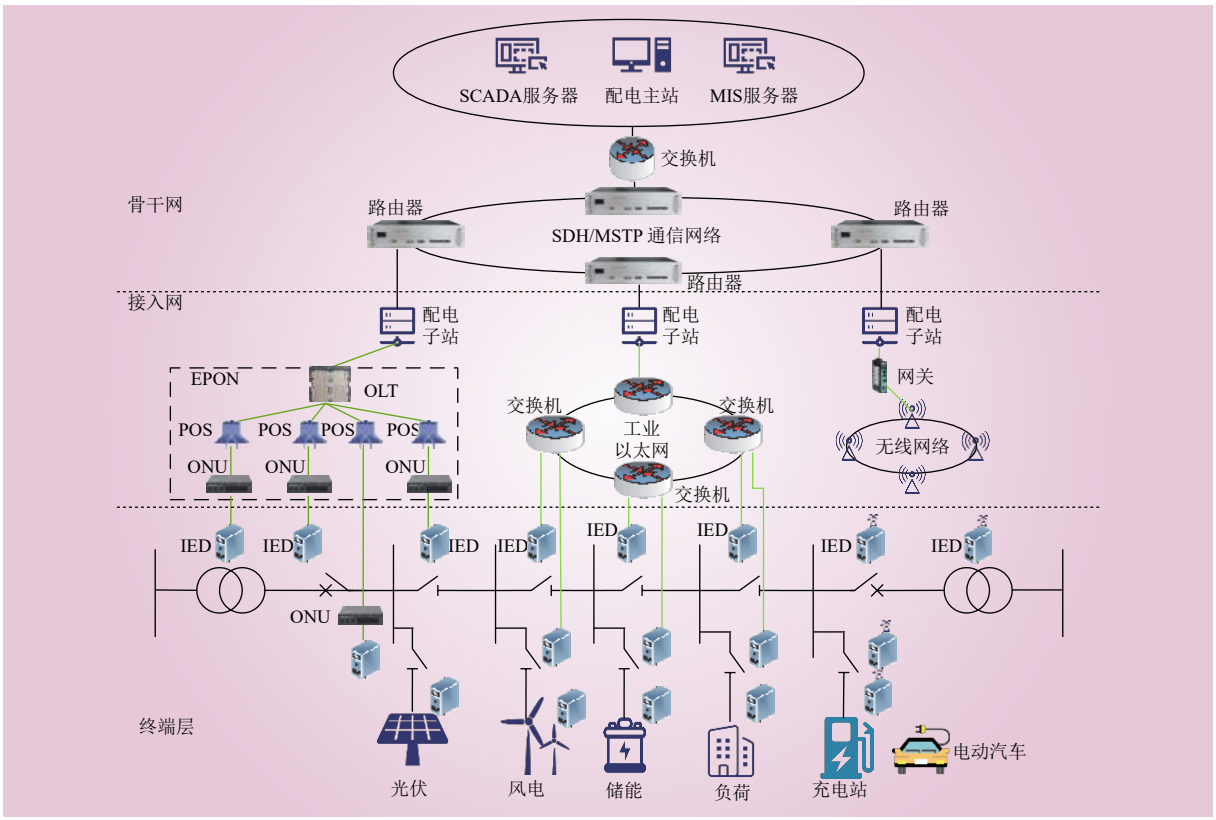

图 1 CPDS 结构

Fig. 1 Structure of CPDS

在可靠性评估和风险评估两个方面，两者相互联系但有所区别。可靠性是电力系统对其服务对象连续供电能力的一种度量，CPDS 可靠性评估是指考虑信息系统的影响，根据一定的可靠性评价指标，评估信息或物理系统故障对负荷可靠性的影响[23]。而 CPDS 风险评估是将风险理论应用到配电系统中，融合了安全风险发生的概率和风险所造成的物理后果两部分因素[24]，侧重于外部网络攻击事件对 CPDS 的冲击程度期望的评估[25]。

2.1　CPDS 可靠性评估

信息通信系统和电力物理系统是 CPDS 的基本组成部分。传统配电网可靠性评估仅关注物理系统的可靠性[26-27]，而 CPDS 将信息系统与物理系统视为深度耦合的整体，在可靠性评估中关注信息系统失效给物理电网可靠性带来的影响，以此反映配电系统可靠性的真实性能[28]。目前，已有一些针对 CPDS 可靠性评估的研究成果，主要集中于信息物理交互机理建模、可靠性评价指标与评估方法等方面。

2.1.1　配电信息物理交互影响机理

对信息物理交互影响机理进行分析是建立 CPDS 可靠性模型和对耦合故障后果分析的基础。CPDS 中信息通信设备通常配有不间断电源，物理系统故障导致的供电中断不会在短时间内波及信息系统，因此现有 CPDS 可靠性研究主要聚焦在信息系统故障对电力系统的影响[23]。

信息系统对电力系统的影响可分为直接作用和间接作用。直接作用是指信息系统元件或功能故障直接导致对应的物理系统元件故障，如断路器智能控制装置故障会直接导致断路器停运[29]、配电网中的分布式电源信息中断时，相当于电源退出运行[30]。间接作用是指信息系统故障不会直接导致物理系统元件失效，但会造成电力物理系统运行和控制性能的恶化，如配电网故障后自愈恢复控制过程中，信息系统若发生故障会影响故障恢复的过程，导致停电范围扩大[12]。文献 [23] 对直接作用和间接作用关系的分析方法进行了综述，指出直接作用分析方法通常有串并联网络法[30]、故障树或可靠性框图法[31]，间接作用关系分析方法有拓扑分析法[32-33] 以及基于模型仿真的方法[34] 等。

在 CPDS 信息系统失效对物理系统影响研究方面，学者们开展了一些研究工作。文献 [35] 考虑信息环节数据传输有误影响，提出一种配电自动化数据传输有误对供电可靠性影响的评估方法。文献 [10] 针对已有 CPDS 可靠性研究中没有考虑多通信方式的问题，建立了基于混合通信网并考虑通信网路由转移和复杂故障因素的 CPDS 信息系统可靠性模型，分析了信息有效性、信息元件故障率以及接入网结构、传输技术和负载率对 CPDS 可靠性的影响。文献 [36] 量化分析了信息失效对配电系统自愈恢复过程的间接影响，分析了信息系统故障对故障恢复场景下计划孤岛以及负荷转供的影响。文献 [37] 将信息系统受到的信息扰动形式分为来自外部的信息攻击和内部的信息元件故障、传输异常等，对多类型的信息扰动进行可靠性建模，并根据“信息扰动–信息故障后果形式–电网故障后果形式”的扰动传播机理，实现对 CPDS 正常运行时、故障后自愈恢复时的信息扰动影响分析。

综上，目前针对 CPDS 信息物理交互影响机理的相关研究主要集中在分析信息系统故障对配电物理系统的影响，包括考虑内、外部信息故障对供电可靠性、馈线自动化自愈过程等的影响。事实上，信息–物理交互机理还应包括信息系统对物理系统信息采集与控制的闭环过程，目前在 CPDS 研究中还未涉及，应在后续研究中予以关注。

2.1.2　CPDS 可靠性评价指标及评估方法

CPDS 可靠性评价指标主要可分为两类。第 1 类是传统配电网可靠性指标，如系统失负荷概率、平均停电时间、系统期望失负荷量、平均供电可用率指标等，是目前研究中最为常用的指标，主要关注信息或物理系统故障对负荷供电可靠性带来的影响[11, 37]。第 2 类可靠性评价指标考虑信息元件失效对系统控制影响，反映 CPDS 的综合可靠性水平[38]。对于 CPDS 可靠性评估方法，目前研究中主要有信息和物理系统都采用解析法、信息系统采用解析法而物理系统采用模拟法、信息系统与物理系统均采用模拟法等 3 类[23]。

2.2　CPDS 风险评估

CPDS 风险评估是对安全风险事件对 CPDS 的冲击程度期望的评估，包含对信息侧网络攻击进行分析、对 CPDS 风险传播途径进行分析以及对信息攻击造成的后果进行评估等。

在网络攻击分析方面，文献 [25] 根据攻击目的，将针对电网 CPS 的网络攻击分为保密性攻击、完整性攻击、可用性攻击等 3 类，并对每一种攻击形式展开综述。其中保密性攻击主要有密码破解、窃听；完整性攻击主要有虚假数据注入攻击[39]、拓扑篡改攻击[40-41]、GPS同步时钟攻击[42]等；可用性攻击主要包括拒绝服务攻击[43]、控制延时攻击[44] 等。文献 [45] 忽略具体的攻击方式，将针对 CPDS 信息攻击归纳为三大类：第 1 类是主站监控系统控制权限丢失或算法遭到篡改；第 2 类是终端、测控设备控制参数遭到修改或拒绝服务；第 3 类攻击针对通信网，造成通信延时、中断或内容篡改。文献 [46] 将 CPDS 中网络攻击对象扩展到可控负荷，对大规模可控负荷被恶意控制的攻击过程进行建模，并分析其对 CPDS 供电可靠性和电能质量的影响。

在风险传播路径分析方面，信息攻击下的 CPDS 风险评估多采用概率风险评估、攻击树、攻击图、贝叶斯网络、Petri 网等分析方法[47]。文献 [12, 48] 针对配电子站，以断路器和分段开关为攻击目标，根据可能的信息攻击路径构建攻击图，并计算攻击各个分段开关和断路器所造成的物理后果。文献 [45] 以 CPDS 运行控制系统为研究对象，通过建立离散信息决策系统与连续物理控制系统间的信息流、控制流接口，实现信息系统风险向物理系统传递过程的动态描述。文献 [47] 针对 CPDS 虚假数据攻击的方式，通过分析信息设备漏洞的不同利用模式，构建了与设备漏洞关联的潜在数据攻击图，提出了基于贝叶斯信息传递图论的融合建模与动态安全风险综合评估方法。文献 [49] 考虑改进的防火墙和密码组件，通过有限随机 Petri 网理论建立了统一的 CPS 模型，并提出一种安全评估方法来分析信道吞吐量变化和系统鲁棒性。

此外，随着先进 ICT 技术在配电自动化系统中的广泛应用，也有研究关注到信息攻击给馈线自动化系统自愈控制带来的安全风险。如文献 [50] 考虑分布式电源的出力波动，对恶意信息攻击对馈线自动化自愈过程的物理影响做出分析，并采用贝叶斯攻击图模型量化成功利用已知或零日漏洞的概率。

在攻击造成的后果评估方面，现有研究主要从对 CPDS 物理侧造成的停电后果的角度进行分析[50-51]。文献 [50] 从攻击造成的故障失负荷量对风险后果进行描述。文献 [12] 采用故障失负荷、故障失用户数、故障失负荷小时数以及故障失用户小时数等物理后果指标，并采用层次分析法进行权重赋值，得到物理后果综合评价指标。文献 [48] 指出在对 CPDS 进行风险评估时，不仅要评估电力物理系统的故障损失，也要对信息系统损失进行评估，并建立了综合电力侧风险、信息侧风险与安全漏洞风险的 CPDS 风险评估指标体系。文献 [49] 进一步提出了一种新型安全风险指标，用于综合评估通信信道中吞吐量的变化以及当相应的功率节点因信息攻击而失效时对 CPDS 的影响。

综上，CPDS 风险评估相关研究在网络攻击建模分析、风险传播路径分析方法、后果评价指标体系等方面已取得了一定的阶段性成果。但还存在现有风险传播分析方法在应对多级跳板攻击和描述攻击行为间的交互关系时存在局限，后果评价指标大多关注物理侧而对信息侧后果考虑不足等问题。此外，现有针对网络恶意攻击建模与分析研究中往往忽视了“社会”和“人”的因素[15]，对恶意攻击者是否具有专业背景、选择哪些节点、采用何种方式、通过何种途径发起攻击等对交互影响规律起到关键影响的攻击者特征行为还没有较为全面地掌握。

3 CPDS 自愈控制方法

自愈控制是保障配电系统运行可靠性的核心技术，其包含事故发生前的预防控制以及事故发生后的故障定位、故障隔离与供电恢复等紧急控制过程。通过配电系统的自愈控制可以实现以下功能：在故障未发生时，通过对配电系统进行脆弱性分析和静态安全分析，对系统运行中存在的不安全因素和薄弱环节进行优化、改善，来减小安全事故的发生风险或避免其发生；在故障发生后，对故障进行定位和隔离，通过负荷转供或计划孤岛运行等方式，实现对非故障停电区域的供电恢复，缩小停电范围[52-53]。

目前，配电系统自愈控制技术研究主要分为 2 个阶段。第一阶段仅单独针对配电物理系统或信息通信系统，从物理侧角度关注故障诊断与定

位[54-56]、考虑分布式电源的故障恢复[57-58]、主动孤岛[59-60]等技术；从信息侧角度分析通信网关键节点辨识[61-62]、通信网故障后的诊断定位[63]与通信恢复[64-65]等。上述研究仅从物理侧或信息侧展开，未考虑CPDS信息系统与物理系统的关联耦合与相互影响，在当前配电系统信息物理深度融合的背景下具有一定的局限性，无法反映配电通信信息系统对自愈恢复控制的影响。为此，有学者陆续关注信息系统故障或遭受网络攻击后对馈线自动化自愈控制产生的影响。CPDS自愈控制研究正向考虑信息物理协同配合的第二阶段发展。

在考虑信息物理协同配合的CPDS自愈控制研究方面，已有文献主要侧重于考虑馈线自动化自愈控制过程的CPDS安全分析，如文献[10, 36-37]针对馈线自动化过程，定量分析内外部各类信息扰动对CPDS故障定位、隔离、恢复等自愈控制过程的影响，并对信息扰动下的CPDS可靠性进行评估。此外，文献[66]提出一种信息侧与电网侧融合的关联态势感知评估方法，可作为电网CPS风险预警、紧急控制、事故分析等的理论依据，为CPDS自愈控制提供决策支撑。文献[67]提出一种基于通信和配电网联合仿真的配电网故障辨识算法，可对CPDS信息系统故障和物理故障进行统一识别，并对CPDS故障区域和故障通信节点定位。文献[68]首次将信息物理融合的概念应用于主动配电网的风险控制中，提出一种两阶段风险控制和单阶段风险警报模型，可同时实现物理侧和信息侧的风险预警和风险控制。

综上所述，目前考虑信息系统影响的CPDS自愈控制的相关研究才刚刚起步。现有研究中大多侧重于馈线自动化传统物理侧的自愈控制过程，对信息系统影响下的自愈控制关注较少。在配电信息系统故障失效或遭受网络攻击的情形下，如何在信息侧和物理侧进行协同控制，进而实现故障的识别、定位、隔离和供电恢复，仍是未来研究工作的重点。

4　CPDS关键技术展望

4.1　两网融合背景下的CPDS架构

CPDS是智能电网与泛在电力物联网两网融合的重要应用场景。现有研究在CPDS架构设计上取得了一定的成果，但在泛在物联的环境下，CPDS架构需要在现有基础上做出一定的调整，以应对大量信息、物理终端设备接入下对系统数据传输与分析计算能力的巨大考验，以及外部可靠性较低的互联网信息接入后对电网信息安全的威胁[15]。为此，两网融合背景下CPDS架构设计应充分考虑多类型终端设备与系统内、外部信息的广泛接入以及多种信息通信方式的采用，结合泛在电力物联网“云-管-边-端”的设计结构，考虑云平台、边缘计算、信息安全防护等技术给CPDS架构及功能带来的影响。

4.2　考虑分布式电源的CPDS安全分析

随着风电、光伏等分布式电源（distributed generator, DG）在配电网中渗透率的不断提升，其对配电系统安全可靠运行带来的影响也愈加增大。大量DG接入给CPDS运行安全性造成的影响总体可分为3个方面：一是从电力物理侧的角度，光伏、风电等可再生能源出力具有较强的波动性和不确定性，大量并网会增加系统运行风险；二是从信息侧角度，大量的分布式电源与信息元件等智能终端设备的接入会增大CPDS信息系统遭受攻击的概率，带来更多的安全隐患；三是从考虑CPDS自愈控制过程的角度，可控分布式电源可作为配电系统的灵活调控资源，在预防控制和供电恢复中可以发挥关键的作用。现有研究针对风、光不确定性给配电物理系统带来的安全风险已开展了一些工作[69-71]，对DG在配电系统自愈控制中所发挥的作用研究也取得一定的进展[72-73]，但鲜有文献从信息物理融合的角度定量分析DG等终端设备的接入给CPDS安全带来的风险，DG在考虑故障自愈过程的CPDS安全分析中所发挥的作用挖掘不够深入。同时，如何在考虑DG影响的基础上，结合电动汽车、需求侧响应负荷等用户侧可控资源进行CPDS安全分析，在后续研究中应予以关注。

4.3　CPDS混合通信网自愈机制

配电通信骨干网通常采用SDH光通信网络和基于SDH的MSTP等技术组网[74]，并配备通道层与复用层等多种保护方式[10]，技术成熟度和可靠度较高。而接入网多采用以太网无源光网络（EPON）、工业以太网、电力载波、无线公网/专网通信等混合通信方式，将多类型的设备终端

进行连接[75]。目前，针对电力通信网脆弱性分析、故障诊断、恢复等已取得了一定的研究成果，但上述研究多是针对输电网通信系统，对于混合通信方式下的 CPDS 接入网自愈机制尚未有文献报道。特别地，在泛在电力物联的背景下，CPDS 将接入大量的智能设备终端和处理巨量的内外部信息，接入网结构和通信机制将更加复杂，对 CPDS 接入网开展安全分析与自愈机制研究显得尤为关键。

4.4 CPDS 信息物理协同自愈控制体系

CPDS 自愈控制现有研究主要侧重于从安全分析角度出发，分析信息故障对 CPDS 自愈过程带来的影响，但未对信息物理系统具体的协同控制方法做出分析，CPDS 自愈控制体系并不明确。未来研究工作中，应针对 CPDS 自愈控制体系进行系统性研究，包括信息侧与物理侧协同配合的预防控制和故障定位、故障隔离以及供电恢复等紧急控制措施。

对于故障前的预防控制，通过信息物理协同态势感知技术，发现 CPDS 结构或运行中存在的安全风险，对风险可能导致的物理后果进行安全评估和预警。根据时间裕度和风险类型在信息侧和物理侧采取适当的改造或控制措施，如从长期规划的角度对通信系统和物理网架的薄弱点进行巩固和加强，从运行控制的角度采取通信链路调整、网络重构、分布式电源出力调整等预防控制措施。对于故障后的紧急控制，通过信息侧和电网侧的协同辨识，判断信息系统异常是由自然故障还是恶意攻击引起。若是由恶意攻击导致，则判别攻击的类型和攻击对象，针对不同的攻击类型在信息侧采取特定的隔离手段，防止攻击范围进一步扩大；同时，在电网物理侧，对被攻击设备以及电网故障点进行物理隔离，通过负荷转供或主动孤岛等方式恢复负荷供电。

5 结论

随着先进信息通信技术在配电网中的广泛应用，配电网正逐步向信息物理深度融合的配电信息物理系统发展。传统配电网分析与控制方法忽略信息系统的影响，难以应对内部信息系统的自然故障或外部网络攻击给 CPDS 带来的安全威胁。学界针对 CPDS 已开展了一定的研究工作，本文主要从分析与自愈控制的角度对 CPDS 研究进行归纳和展望，主要结论如下。

（1）CPDS 的基本结构与功能已比较明确。但在两网融合的背景下，CPDS 架构需要进一步的设计与丰富，以应对智能终端设备的大量接入和对不安全的外部信息的处理。

（2）CPDS 分析包括可靠性评估和风险评估。现有研究主要从信息物理交互影响机理、针对网络攻击建模、风险传播机制、可靠性指标或风险指标、后果评价等方面开展分析，取得了一定的研究成果。但存在信息物理交互机理简化程度较高、后果评价指标大多侧重于物理侧而对信息侧安全反映不足，以及分布式电源的大量接入对 CPDS 信息侧和物理侧安全影响挖掘不够深入等问题，需要进一步开展研究。

（3）现有研究针对配电系统自愈控制开展了大量的工作，但大多研究只关注于物理侧，从信息物理融合的整体视角对 CPDS 自愈控制进行分析的研究尚少。CPDS 混合通信网自愈机制尚不明确，信息物理协同自愈控制体系亟须建立。

参考文献：

[1] 马钊, 刘颖异, 尚宇炜, 等. CIGRE 2016 未来电力系统及主动配电系统技术新动向 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 27–36.
MA Zhao, LIU Yingyi, SHANG Yuwei, *et al*. CIGRE 2016 development trends of future power system and active distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 27–36.

[2] GILL S, KOCKAR I, AULT G W. Dynamic optimal power flow for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 121–131.

[3] 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.
ZHENG Peixiang. Theoretical architecture and typical scenario applications of cyber physical systems in the distribution network[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 10–16.

[4] 马钊, 安婷, 尚宇炜. 国内外配电前沿技术动态及发展 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1552–1567.
MA Zhao, AN Ting, SHANG Yuwei. State of the art and development trends of power distribution technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1552–1567.

[5] 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.

[6] 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估 [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.

[7] 郭庆来, 辛蜀骏, 王剑辉, 等. 由乌克兰停电事件看信息能源系统综合安全评估 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 145–147.
GUO Qinglai, XIN Shujun, WANG Jianhui, *et al*. Comprehensive security assessment for a cyber physical energy system: a lesson from ukraine's blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 145–147.

[8] 李保杰, 刘岩, 李洪杰, 等. 从乌克兰停电事故看电力信息系统安全问题 [J]. 中国电力, 2017, 50(5): 71–77.
LI Baojie, LIU Yan, LI Hongjie, *et al*. Enlightenment on the security of cyber information system under smart grid from Ukraine blackout[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 71–77.

[9] 李中伟, 佟为明, 金显吉. 智能电网信息安全防御体系与信息安全测试系统构建: 乌克兰和以色列国家电网遭受网络攻击事件的思考与启示 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 147–151.
LI Zhongwei, TONG Weiming, JIN Xianji. Construction of cyber security defense hierarchy and cyber security testing system of smart grid: thinking and enlightenment for network attack events to national power grid of Ukraine and Israel[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 147–151.

[10] 朱朝阳. 委内瑞拉大停电事故的背后 [J]. 国家电网, 2019(5): 72–74.

[11] 刘文霞, 宫琦, 郭经, 等. 基于混合通信网的主动配电信息物理系统可靠性评价 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1706–1718, 1907.
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): 1706–1718, 1907.

[12] 张宇航, 倪明, 孙永辉, 等. 针对网络攻击的配电网信息物理系统风险量化评估 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 12–30, 33.
ZHANG Yuhang, NI Ming, SUN Yonghui, *et al*. Quantitative risk assessment of cyber-physical system for cyber-attacks in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 12–30, 33.

[13] 李红, 朱红, 杨志宏, 等. 配电网 CPS 综合建模方法及其交互影响机理研究 [J]. 中国电力, 2019, 52(1): 17–24.
LI Hong, ZHU Hong, YANG Zhihong, *et al*. Research on integrated modeling method and interactive influence mechanism of distribution network CPS[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 17–24.

[14] 曾鸣. 国家电网公司“三型两网”的战略内涵及实施问题 [J]. 中国电力企业管理, 2019(4): 54–56.

[15] 薛禹胜. AI 在模型驱动为主的电力系统分析中的正确定位 [Z]. 2019. https://mp.weixin.qq.com/s/64qUxY0BsAV-PBnk1qB-_Q

[16] XUE Y S, YU X H. Beyond smart grid: cyber-physical-social system in energy future [point of view][J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(12): 2290–2292.

[17] YU Xinghuo, XUE Yusheng. Smart grids: a cyber–physical systems perspective[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(5): 1058–1070.

[18] 张亚健, 杨挺, 孟广雨. 泛在电力物联网在智能配电系统应用综述及展望 [J]. 电力建设, 2019, 40(6): 1–12.
ZHANG Yajian, YANG Ting, MENG Guangyu. Review and prospect of ubiquitous power Internet of Things in smart distribution system[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(6): 1–12.

[19] 龚钢军, 罗安琴, 陈志敏, 等. 基于边缘计算的主动配电网信息物理系统 [J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3128–3135.
GONG Gangjun, LUO Anqin, CHEN Zhimin, *et al*. Cyber physical system of active distribution network based on edge computing[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3128–3135.

[20] 吕军, 栾文鹏, 刘日亮, 等. 基于全面感知和软件定义的配电物联网体系架构 [J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3108–3115.
LÜ Jun, LUAN Wenpeng, LIU Riliang, *et al*. Architecture of distribution Internet of Things based on widespread sensing & software defined technology[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3108–3115.

[21] 谭雪, 刘俊, 郑宽, 等. 新一轮能源革命下中国电网发展趋势和定位分析 [J]. 中国电力, 2018, 51(8): 49–55.
TAN Xue, LIU Jun, ZHENG Kuan, *et al*. Research on tendency and positioning of power grid development in the new round energy revolution[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 49–55.

[22] 殷树刚, 许勇刚, 李祉岐, 等. 基于泛在电力物联网的全场景网络安全防护体系研究 [J]. 供用电, 2019, 36(6): 83–89.
YIN Shugang, XU Yonggang, LI Zhiqi, *et al*. Research on full-scenario network security protection system adapted to the ubiquitous internet of things in electricity[J]. Distribution & Utilization, 2019,

36(6): 83–89.

[23] 郭经, 刘文霞, 张建华, 等. 主动配电信息物理系统可靠性建模与评估方法综述 [J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2403–2412.
GUO Jing, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, *et al*. A survey of reliability modeling and evaluation methods for active distribution cyber-physics systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2403–2412.

[24] 袁修广. 配电网可靠性与风险性评估方法的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
YUAN Xiuguang. Research on reliability and risk evaluation methods of distribution network[D]. Changsha: Hunan University, 2015.

[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] 崔立忠, 张瑞雪, 刘涛, 等. 复杂配电自动化系统可靠性计算及设备布局规划 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 84–91.
CUI Lizhong, ZHANG Ruixue, LIU Tao, *et al*. Reliability calculation and equipment layout planning for complex distribution automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 84–91.

[27] 赵华, 王主丁, 谢开贵, 等. 中压配电网可靠性评估方法的比较研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3295–3302.
ZHAO Hua, WANG Zhuding, XIE Kaigui, *et al*. Comparative study on reliability assessment methods for medium voltage distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3295–3302.

[28] 邓良辰, 刘艳丽, 余贻鑫, 等. 考虑故障处理全过程的配电网信息物理系统可靠性评估 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 22–29.
DENG Liangchen, LIU Yanli, YU Yixin, *et al*. Reliability assessment of distribution network CPS considering whole fault processing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 22–29.

[29] 郭嘉, 韩宇奇, 郭创新, 等. 考虑监视与控制功能的电网信息物理系统可靠性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2123–2130.
GUO Jia, HAN Yuqi, GUO Chuangxin, *et al*. Reliability assessment of cyber physical power system considering monitoring function and control function[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2123–2130.

[30] 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.

[31] DOMINGUEZ-GARCIA A D. Reliability modeling of cyber-physical electric power systems: a system-theoretic framework[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012. San Diego, CA. IEEE, 2012: 1-5.

[32] 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.

[33] 薛禹胜, 李满礼, 罗剑波, 等. 基于关联特性矩阵的电网信息物理系统耦合建模方法 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 11–19.
XUE Yusheng, LI Manli, LUO Jianbo, *et al*. Modeling method for coupling relations in cyber physical power systems based on correlation characteristic matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 11–19.

[34] 张天宇, 罗凤章, 王成山, 等. 信息系统对微电网运行可靠性的影响分析 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 28–35.
ZHANG Tianyu, LUO Fengzhang, WANG Chengshan, *et al*. Influence of information system on microgrid operation reliability[J]. automation of electric power systems, 2016, 40(23): 28–35.

[35] 罗凤章, 杨文涛, 张天宇, 等. 配电自动化数据传输有误对配电系统供电可靠性的影响 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 10–19.
LUO Fengzhang, YANG Wentao, ZHANG Tianyu, *et al*. Influence of distribution automation data transmission errors on power supply reliability of distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 10–19.

[36] 刘文霞, 林子鉴, 马铁, 等. 计及信息失效影响的主动配电系统可靠性建模与评估 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 94–105.
LIU Wenxia, LIN Zijian, MA Tie, *et al*. Reliability modeling and evaluation of active distribution system considering effect of cyber invalidity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 94–105.

[37] 陈碧云, 陆智, 李滨. 计及多类型信息扰动的配电网可靠性评估 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 103–113.
CHEN Biyun, LU Zhi, LI Bin. Reliability assessment of distribution network considering multiple types of information disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 103–113.

[38] 郭经, 刘文霞, 张建华, 等. 计及控制功能失效的微电网信息物理系统可靠性评估 [J]. 现代电力, 2019, 36(2): 73–80.
GUO Jing, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, *et al*. Reliability

evaluation of microgrid cyber physical system considering control function failure[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(2): 73–80.

[39] LIANG G Q, ZHAO J H, LUO F J, *et al*. A review of false data injection attacks against modern power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1630–1638.

[40] KIM J, TONG L. On topology attack of a smart grid: undetectable attacks and countermeasures[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(7): 1294–1305.

[41] ZHANG Y C, WANG L F, XIANG Y M. Power system reliability analysis with intrusion tolerance in SCADA systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 669–683.

[42] ZHANG Z H, GONG S P, DIMITROVSKI A D, *et al*. Time synchronization attack in smart grid: impact and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 87–98.

[43] ZHANG H, CHENG P, SHI L, *et al*. Optimal DoS attack scheduling in wireless networked control system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(3): 843–852.

[44] SARGOLZAEI A, YEN K K, ABDELGHANI M N. Preventing time-delay switch attack on load frequency control in distributed power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1176–1185.

[45] 安宇, 刘东, 陈飞, 等. 考虑信息攻击的配电网信息物理运行风险分析 [J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2345–2352.
AN Yu, LIU Dong, CHEN Fei, *et al*. Risk analysis of cyber physical distribution network operation considering cyber attack[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2345–2352.

[46] 吴亦贝, 李俊娥, 陈汹, 等. 大规模可控负荷被恶意控制场景下配电网风险分析 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 30–37.
WU Yibei, LI Jun'e, CHEN Xiong, *et al*. Risk analysis of distribution network with large-scale controllable loads with attacks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 30–37.

[47] 黄校娟, 付蓉, 吴英俊, 等. 网络攻击下基于贝叶斯图论的配电系统安全分析 [J]. 电力建设, 2019, 40(1): 86–95.
HUANG Xiaojuan, FU Rong, WU Yingjun, *et al*. Analysis on security of distribution system based on Bayesian graph theory under network attack[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(1): 86–95.

[48] 侯栋宸, 孙永辉, 张宇航. 基于变权 FAHP 的配电 CPS 风险评估方法 [J/OL]. 电力系统及其自动化学报, https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000250.
HOU Dongchen, SUN Yonghui, ZHANG Yuhang. Risk assessment of distribution CPS based on variable weight FAHP[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA, https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000250.

[49] FU R, HUANG X J, XUE Y S, *et al*. Security assessment for cyber physical distribution power system under intrusion attacks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 75615–75628.

[50] DAI Q S, SHI L B, NI Y X. Risk assessment for cyber attack in active distribution systems considering the role of feeder automation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3230–3240.

[51] 韩丽芳, 胡博文, 杨军, 等. 基于攻击预测的电力 CPS 安全风险评估 [J]. 中国电力, 2019, 52(1): 48–56.
HAN Lifang, HU Bowen, YANG Jun, *et al*. A new security risk assessment method for cyber physical power system based on attack prediction[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 48–56.

[52] 董旭柱. 智能配电网自愈控制技术的内涵及其应用 [J]. 南方电网技术, 2013, 7(3): 1–6.
DONG Xuzhu. Introduction of self-healing control technology in smart distribution systems and its application[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(3): 1–6.

[53] 于士斌, 徐兵, 张玉侠, 等. 智能配电网自愈控制技术综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 65–70.
YU Shibin, XU Bing, ZHANG Yuxia, *et al*. Review on self-healing control technique in smart distribution grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 65–70.

[54] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4399–4409.
DENG Feng, LI Xinran, CENG Xiangjun, *et al*. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4399–4409.

[55] 童晓阳, 张绍迅. 基于灰色关联度的配电网故障区段定位与类型识别方法 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 113–118.
TONG Xiaoyang, ZHANG Shaoxun. Grey relational degree based fault section location and type recognition method for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 113–118.

[56] 徐彪, 尹项根, 张哲, 等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 152–161.
XU Biao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, *et al*. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 152–161.

[57] 娄铖伟, 张筱慧, 丛鹏伟, 等. 含柔性软开关的有源配电网故障恢复策略 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 23–31.
LOU Chengwei, ZHANG Xiaohui, CONG Pengwei, *et al*. Service restoration strategy of active distribution network with soft open points[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 23–31.

[58] 王雨婷, 张筱慧, 唐巍, 等. 考虑光伏及负荷时变性的配电网故障恢复 [J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2706–2716.
WANG Yuting, ZHANG Xiaohui, TANG Wei, *et al*. Fault recovery of distribution network considering time variation of photovoltaic and load[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2706–2716.

[59] 陈玮, 周贤正, 李晏君, 等. 考虑电动汽车配置的主动配电网鲁棒孤岛恢复 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 58-67.
CHEN Wei, ZHOU Xianzheng, LI Yanjun, *et al*. A robust islanding restoration policy for active distribution network considering optimal allocation of emergency electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 58-67.

[60] 汤一达, 吴志, 顾伟. 主动配电网故障恢复的重构与孤岛划分统一模型 [J/OL]. 电网技术, https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1483.
TANG Yida, WU Zhi, GU Wei. Research on active distribution network fault recovery strategy based on unified model considering reconstruction and island partition[J/OL]. Power System Technology, https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1483.

[61] 李炅菊, 黄宏光, 舒勤. 相依网络理论下电力通信网节点重要度评价 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(44): 143–150.
LI Guiju, HUANG Hongguang, SHU Qin. Evaluation method for node importance in power telecommunication network based on interdependent network theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(44): 143–150.

[62] 李昌超, 康忠健, 于洪国, 等. 考虑电力业务重要性的电力通信网关键节点识别 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2384–2394.
LI Changchao, KANG Zhongjian, YU Hongguo, *et al*. Identification of key nodes in power communication network considering the importance of power businesses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2384–2394.

[63] 聂晓音, 谢刚, 李洋, 等. 基于栈式相关性稀疏自编码的电力通信网故障诊断 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 158–163.
NIE Xiaoyin, XIE Gang, LI Yang, *et al*. Fault diagnosis of power communication network based on stacked relational sparse autoencoder[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 158–163.

[64] 袁捷, 张民磊. 基于 SDN 的电力信息系统故障恢复机制研究 [J]. 计算机与现代化, 2018(11): 7–11.
YUAN Jie, ZHANG Minlei. Research on fault recovery mechanism of power information system based on SDN[J]. Computer and Modernization, 2018(11): 7–11.

[65] 罗紫航, 关翔友, 魏震波. 考虑自恢复能力的电力-通信网可靠性与经济性分析 [J]. 四川电力技术, 2019, 42(5): 10–16, 55.
LUO Zihang, GUAN Xiangyou, WEI Zhenbo. Reliability and economy analysis of cyber physical power systems considering self-recovery ability[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2019, 42(5): 10–16, 55.

[66] 刘权莹, 李俊娥, 倪明, 等. 电网信息物理系统态势感知: 现状与研究构想 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 9–23.
LIU Quanying, LI Jun'e, NI Ming, *et al*. Situation awareness of grid cyber-physical: system status and research ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 9–23.

[67] 张志鹏, 李勇, 曹一家, 等. 通信和电网联合仿真的配电网局部异常因子故障辨识算法 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 44–50.
ZHANG Zhipeng, LI Yong, CAO Yijia, *et al*. A local outlier factor fault identification algorithm based on the co-simulation between cyber and power system for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 44–50.

[68] WANG Y. Risk control cyber physical system for active distributed network[Z]. 2018: 1-6.

[69] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 346-351.
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.

[70] 芦晶晶, 赵渊, 赵勇帅, 等. 含分布式电源配电网可靠性评估的点估计法 [J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2250–2257.
LU Jingjing, ZHAO Yuan, ZHAO Yongshuai, *et al*. A point estimation method for reliability evaluation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2250–2257.

[71] 田继伟, 王布宏, 李夏. 智能电网状态维持拓扑攻击及其对经济运行的影响 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 50–56.
TIAN Jiwei, WANG Buhong, LI Xia. State-preserving topology attacks and its impact on economic operation of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 50–56.

[72] 王昌照. 含分布式电源配电网故障恢复与可靠性评估研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.

WANG Changzhao. Research on service restoration and reliability evaluation of distribution network with distributed generation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

[73] 蒋乐. 基于分布式电源支撑的主动配电网供电恢复方法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
JIANG Le. Power supply restoration for active distribution system based on the support of distributed generation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[74] 郑毅, 甘志洲, 陈潋. 配电网 EPON 通信接入与分区自治 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 114–118.
ZHENG Yi, GAN Zhizhou, CHEN Lian. EPON communication network and its regional autonomy in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 114–118.

[75] 梁云, 黄莉, 侯兴哲, 等. 配电网 CPS 的通信需求和网络资源分配方案探讨 [J]. 中国电力, 2019, 52(1): 32–39.
LIANG Yun, HUANG Li, HOU Xingzhe, *et al*. Discussion on communication requirement and network resource allocation scheme of cyber physical system for distribution network[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 32–39.

作者简介：

李晓 (1994—)，男，硕士，助理工程师，从事电力信息物理系统、配电 CPS 安全分析与控制等研究，E-mail: lixiao5@sgepri.sgcc.com.cn；

李满礼 (1989—)，男，硕士，工程师，从事电力信息物理系统、电网安全稳定控制等研究，E-mail: limanli@sgepri.sgcc.com.cn；

倪明 (1969—)，男，通信作者，博士，高级工程师 (研究员级)，从事电力信息物理系统、电力系统安全稳定控制等研究，E-mail: ni-ming@sgepri.sgcc.com.cn。

（责任编辑　李博）

A Review of Analysis and Control of Cyber Physical Distribution System

LI Xiao[1,2,3], LI Manli[1,2,3], NI Ming[1,2,3]

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China; 3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: With the widespread application of advanced information and communication technologies in distribution networks, the distribution networks have become increasingly stronger in terms of integration between the cyber side and physical side, and have had the typical characteristics of cyber physical system. This paper analyzes the research status of the cyber physical distribution system (CPDS) from the perspective of analysis and self-healing control. In terms of analysis, it summarizes and analyzes the reliability assessment and risk assessment of CPDS, respectively. In terms of CPDS self-healing control, a review is made of the traditional physical-side self-healing control and the cyber-physical collaboration. The progress and deficiencies of existing research are analyzed. Finally, the future research directions of CPDS are predicted from four perspectives, including the CPDS architecture under the background of ubiquitous power internet of things, the CPDS security analysis considering distributed generator, the self-healing mechanism of the CPDS hybrid communication network, and the CPDS self-healing control system.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (Basic Theories and Methods of Analysis and Control of the Cyber Physical Systems for Power Grid, No. 2017YFB0903000), the National Natural Science Foundation of China (Research on Cyber-Physical Security Theories and Active Defense Technologies for Smart Grids against Cyber-Attacks, No. 61833008), Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (Research on Cooperative Situation Awareness and Active Defense Method of Cyber Physical Power System For Cyber Attack).

Keywords: distribution network; cyber physical system (CPS); reliability assessment; risk assessment; self-healing control