

# 透明电网理论框架与关键技术

李立涅, 蔡泽祥, 唐文虎, 张勇军, 张俊勃, 武志刚, 阳林\*, 韩永霞, 管霖

(华南理工大学电力学院, 广州 510641)

**摘要:** 构建适应大规模、高比例新能源的新型电力系统, 支持实现碳达峰、碳中和发展目标, 是能源电力行业的全局性变革举措; 透明电网作为“互联网+智慧能源”的高级形态, 在支撑能源转型、促进新型电力系统发展方面具有重大价值。本文提出了透明电网能源生态圈概念, 梳理了透明电网的主要业务需求、目标愿景、基本特征, 规划了透明电网的发展蓝图; 阐述了透明电网关键科学与技术体系, 包括增量科技创新要素、涉及的理论与科学方法, 进而研判了透明电网关键技术与基础装备所需的感知层、网络层、平台层、应用层技术。研究建议, 以“透明电网新基建”为核心, 推动能源低碳转型, 构建安全高效的现代能源体系; 开展小微智能传感器、对接国家工业互联网的软件系统、智能装备、数据驱动的电力增值服务科技专项攻关, 尽快形成透明电网关键技术与装备体系。本研究突出了透明电网在实现资源优化配置方面的关键作用, 可为电力市场驱动的电力能源生态圈研究提供基础参考。

**关键词:** 透明电网; 能源生态圈; 新型电力系统; 能源转型; 小微传感器; 智能装备

**中图分类号:** TK01   **文献标识码:** A

## Theoretical Framework and Key Technologies of Transparent Power Grid

Li Licheng, Cai Zexiang, Tang Wenhui, Zhang Yongjun, Zhang Junbo, Wu Zhigang, Yang Lin\*, Han Yongxia, Guan Lin

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Building a new power system that adapts to large-scale high-proportion new energy sources and supports the achievement of carbon peaking and carbon neutrality goals is an overall reform measure for the energy and power sectors. Transparent power grid is an advanced form of Internet Plus Smart Energy and is crucial for supporting energy transformation and developing new power systems. This paper puts forward a concept of transparent power grid energy ecosystem, sorts out the main business requirements, goals, vision, and basic characteristics of a transparent power grid, and devises a development blueprint for the transparent power grid. A key scientific and technical system of the transparent power grid is elaborated from two perspectives: incremental scientific and technical elements as well as theories and scientific methods involved, and the perception layer, network layer, platform layer, and application layer technologies required by the key technologies and basic equipment of the transparent power grid are discussed. The research suggests that, with the “transparent power grid new infrastructure” as the core, the low-carbon transformation of energies should be promoted to build a safe and efficient modern energy system; it is necessary to develop small and micro smart sensors, software systems connected to the national industrial Internet, smart equipment, and data-driven value-added power services. Special scientific and technical research projects should be conducted to form the key technology and equipment systems of the transparent

收稿日期: 2022-04-05; 修回日期: 2022-05-16

通讯作者: \*阳林, 华南理工大学电力学院副教授, 研究方向为气候变化下输变电设备运行安全评估与防御策略; E-mail: eplyang@scut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新时代、新业态下新型‘互联网+’行动计划发展战略研究”(2021-XZ-24)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

power grid. This paper highlights the key role of the transparent power grid in realizing the optimal allocation of resources, and can provide a basic reference for the research on market-driven power energy ecosystems.

**Keywords:** transparent power grid; energy ecosystem; new-type power system; energy transformation; micro sensors; intelligent equipment

## 一、前言

当前,世界能源行业顺应数字化时代趋势演进发展,我国电力体制改革深入推进,加快能源转型成为国内外共识。我国积极实施碳达峰、碳中和目标计划,体现了推动世界绿色低碳转型的决心与担当 [1]。构建以新能源为主体的新型电力系统,是国家重大部署、电力工业发展趋势,对引领电力企业转型发展、拓展新型电力理论研究具有重要意义 [2]。

在我国,电网数字化建设仍处于起步阶段,新一代信息通信技术在电网中的技术拓展、应用场景等研究仍不充分,相应系统的研究框架有待形成。李立涅研究团队率先提出的“透明电网”理念,侧重信息通信技术与电网应用的结合,可为新型电力系统数字化建设、未来电网发展提供基础参考。本文旨在系统论述透明电网的理论框架与关键技术,及时反映新的宏观态势,为我国透明电网建设筑牢理论基础。具体来说,梳理透明电网的能源生态圈概念、业务需求、愿景及特征、发展蓝图,剖析透明电网关键科学与技术体系,分析技术体系与基础装备涉及的多层次关键技术,进而提出我国透明电网发展建议。

## 二、透明电网的能源生态圈与业务需求

### (一) 透明电网能源生态圈概念

透明电网是在能源转型趋势下,电网与以互联网为代表的新一代信息通信技术相融合的新型发展形态,整合了当前的主要技术进步与行业发展需求。通过应用互联网理念、“大云物移智链”等先进技术,对现有分散的系统及平台进行整合和创新,加强“源网荷储”全链条感知与控制能力,实质性提升电网的建设、运维、管理水平;打破运行控制、运营管理的业务壁垒,掌握海量终端用户和运行大数据,实现能量流、业务流、数据流的透明化管控,进而充分发挥资源优化配置作用,形成电力市场驱动的电力能源生态圈(见图1)。

### (二) 透明电网的业务需求

#### 1. 常规业务升级与优化

一是电网状态全面感知。透明电网智能运维将广泛应用小微智能传感器、无线传感器采集的电网数据,构建大规模传感网络;基于小微智能传感控制、新一代通信技术,开发边缘计算和自适应控制算法;结合机器学习等人工智能(AI)算法,快速汇总、分析、处理海量数据,实现设备健康、环境状态等的在线实时智能感知,支持故障诊断和运维决策,提高系统供电的可靠性。

二是数字运营管控平台。为适应快速发展的电网管理需要,基于透明电网云平台,以现有资产管理系统、地理信息系统等的逐步云化、微服务化改造为基础,建设企业级电网管理平台;统一资产实物管理与价值管理,整合电网规划、设计、施工、设备供应等企业资源,构建合作生态;打破各类信息系统壁垒,推动各种业务数据接入大数据共享平台,强化电网各业务的横向协同、各层级的纵向贯通能力。

三是电网运行的智慧决策。将领域知识与机器学习方法相结合,实现模型驱动和数据驱动的互补,深度挖掘大规模传感网络所获取海量数据的潜在价值。以透明电网云平台为基础,以“模型+数据”混合驱动方式为支柱,实现全网数据资源的统一管理;发挥透明电网泛在可见、可知、可控的数据优势,为电网高效经济、安全稳定运行提供智慧决策支持。

#### 2. 新兴业务拓展与管理

一是电力交易和节电业务。《电力发展“十三五”规划(2016—2020年)》提出,建立并健全电力市场体系,建立标准统一的电力市场交易技术支持系统。因此,提高交易透明度是电力市场建设的关键任务,主要体现在以下两方面。①在保障信息安全前提下的电力交易信息共享。目前各省份电力交易系统之间面临衔接统筹不足问题,交易信息共享、数据交互存在很大阻碍,导致电力调度运行数据、市场信息、市场交易等公开信息的透明性不足。透明电网通过用户用电行为的透明化,可以预



电力保险服务能力及团队，为电力行业客户提供精细化、专业化、差异化服务。

### 三、透明电网的愿景、特征与发展蓝图

#### (一) 透明电网的目标愿景

在电能生产方面，实时感知负荷需求并智能预测负荷，综合考虑可再生能源消纳、系统运行成本，开展“源荷”协调优化调度以提高能源利用效率。积极支持新能源能效发挥，推动新能源从补充能源转向替代能源甚至主体能源，为构建“清洁低碳、安全高效”的能源体系提供坚实支撑。

在电网运营方面，一方面以智能电气设备为载体来实现电网的灵活、快速控制，以AI、现代控制技术为手段来保障电网智能化运行，以电网运行效率及稳定性的显著提高来引领智能电网迈向高级阶段；另一方面鼓励电网企业面向用户推动业务与数字化技术融合，提供全面的数字化业务服务并最终实现全部业务的高效数字化。

在储能服务方面，实施储能装置的大规模分布式应用，提升可再生能源大规模接入时的电网安全水平和运行效率，兼顾需求侧快速响应和用户经济效益改善。

在电能消费侧服务方面，基于透明电网的分布式能源与小微能源“产销”一体模式，实现能源供给模式由集中式转向分布式；对用户能耗设备信息进行监控和感知，统筹控制用户的分布式电源、电能储存设备、可控负载，达到电能供需平衡。

在数据资产运营方面，实现透明电网中所有设备、各类状态的数据信息深度透明，自由获取相关的历史信息、在线信息，合理预测未来数据信息。

在设备及平台运维管理方面，以大规模应用的小微智能传感器、无线传感器为基础，构建泛在传感网络，形成监测电网设备、测量大电网广域大数据的基本能力。

在能源及衍生品交易方面，依托电网的透明化，支持“源网荷储”参与者的自由选择、灵活交易，使得电力生产、输送、转换、消费、交易等的边际成本趋零。

在能源产业金融服务方面，以透明电网作为构建能源生态系统的重要主体，发挥好“管道”“平台”作用，引领能源转型。

#### (二) 透明电网的基本特征

##### 1. 电网状态全面感知

在线实时感知设备健康状态、环境状态等，实现电网状态监测、态势感知、智能运维。在线实时感知电网传输能力、电能质量等，实现电网安全风险评估、经济运行优化、智能决策调度。实时发布电网输配电价格、各类电力市场及辅助服务价格、交易过程/结果，便于“源网荷储”参与者自由选择交易，市场监管者、各方参与者实时监控交易过程。

##### 2. 信息传递透明

通过严格的权限分配实现信息共享，构建能源网络拓扑关系信息数据库。利用大数据分析技术，识别能源传输网络的拓扑信息并保持状态透明。整体规划多机构、多层面，兼顾一定独立性的应用部署模式，实行数据统一管理和信息集成。

##### 3. 业务透明

构建分布式控制和优化框架，驱动多个主体协同合作，配置全系统运行目标，完成各业务之间的相互衔接，实现业务透明。

##### 4. 运行状态透明

运用系统安全性分析理论、大数据分析技术，实时研判各能源系统传输能力、供能质量等信息，全面掌握电网的设备信息、运行数据、日报数据。

##### 5. 广泛参与性

通过泛在互联和深度感知，汇集各类资源参与电力系统的运行和调节，促进“源网荷储”协同互动，推动“源随荷动”模式转向“源荷互动”模式。

##### 6. 自由存储和获取电网数据

利用小微智能传感器、传感网络、软件平台以及通信技术、大数据技术、云计算技术、边缘计算技术、AI技术，实现电网的自由（无限/海量）数据存储和获取。

##### 7. 能源市场交易状态透明

网络各节点、各时段可供能的能力、质量、价格，各类辅助服务的价格趋向透明化和市场化，实时获取能源市场信息；市场盈利机制成熟，能源交易过程公平、公正、公开。

#### (三) 透明电网的发展蓝图

##### 1. 促进用能的清洁低碳

在推进能源供给侧改革方面，建设透明电网将

积极消纳清洁能源，推动电力市场深化改革，有利于完善与可再生能源相关的电力市场规则；完善天然气发电、可再生能源电力消纳保障机制，激励相关灵活性资源的投资；保持与电力规划的协调，优化电力系统调度运行。

在优化能源供应结构方面，建设透明电网将遵循保障能源供应安全、促进能源清洁低碳的主线，推动煤炭清洁高效利用并严格控制煤炭消费总量；扩大天然气发电规模，提高天然气利用水平；加快发展非化石能源，提高在电力消费中的比重；积极争取区外清洁能源供应，满足新增用能用电需求；改善重点领域、重点行业的电力使用效率，确保能源高效利用；提升终端用能的电气化水平，使得能源发展的环境效益深入终端层面。

### 2. 保障用电的安全高效

完善主干电网结构，在外部建设外环通道，在内部建设柔直“背靠背”通道；各分区组团互联，分层分区合理、区间联络清晰，消除电网短路电流超标、潮流大规模转移、交直流相互影响等电网运行风险。科学构建主网架结构，确保容量充足、结构清晰、运行高效、事故可控；提升电力基础设施的互联互通水平，改善电力安全保障与电力资源优化配置能力。

基于透明电网的数字运营管控平台，从提高电力系统抗风险能力、健全能源应急联通协作机制等方面开展能源抗风险体系建设，提高能源系统抗风险能力。

将网络安全建设作为透明电网安全建设的重要环节，做好政策协调，制定规范标准，不断提升信息安全服务水平。

全方位加强能源领域的资源、技术、贸易合作与融合，构建多元能源供应体系。强调透明电网安全发展，强化能源“储运”网络，完善能源应急保障机制，提升能源系统抗风险能力，筑牢能源安全基石。

统筹区域之间的能源发展关系，推动能源与制造、交通、海洋、信息等产业协同发展；以“源网荷储”协调发展、高效运行，促进资源优化配置与区域高质量发展。

能源节约与高效低碳利用并举，推动能源消费革命，推广区域综合能源利用，抑制不合理能源消费，提高能源利用效率。通过透明电网提质增效，

开创节约高效、绿色低碳经济的用能新局面。

### 3. 创新电力行业发展业态

推动智能输配电产业发展。促进“大云物移链”等信息通信技术与电力系统自动化产业的融合，实施核心设备的智能化升级与国产化制造，壮大柔性直流输配电成套设备、智能电网、用户端装备制造制造业。广泛应用主动配电网、“即插即用”电力电子并网设备等，满足分布式电源的灵活友好接入需求。

充分利用并整合现有基础来开展透明电网建设，推动智慧城市、互联网、信息通信技术与能源系统及能源市场的深度融合，引领能源互联网新技术、新模式、新业态，促进能源产业转型升级。通过能源生产与运营的智能化，促进电气化与信息化深度融合的能源消费，建立开放互信的能源市场，构建智慧能源体系。

保持能源科技创新投入，以能源互联网智慧能源建设来推动能源领域“政产学研”合作，培育智慧能源创新产业生态圈。发挥政府规划的引领和调控作用，增强企业在能源科技创新中的主体地位，建设能源产业自主创新高地和先进制造产业基地。

改革能源管理体制机制，推动能源市场一体化发展，促进各类能源要素的自由流通和高效配置。创新能源协调监管、投融资、价格形成等机制和市场交易模式，破除旧有能源体制机制对高质量发展的阻碍作用。

## 四、透明电网关键科学与技术体系

### （一）透明电网的增量科技创新要素

“风、光、储”以及智能终端的广泛接入，显著增加了电力系统的复杂性和不确定性；为了适应系统演进，电网架构应同步升级。透明电网以全电网数据的全生命周期透明可视为主要特征，是适宜的技术路线方案，而面向传统电力系统的理论方法与关键技术体系难以直接沿用。

透明电网的发展依托小微智能传感器的广泛配置，信息流的感知、传输、处理、应用体系，显然需要新增诸多理论与科学方法以提供坚实支撑：①网络理论与方法，以物联网理论为代表，促成透明电网中的设备多样化和万物互联；②数据科学理论与方法，支持实现透明电网中海量数据的全生命

周期；③ AI理论与方法，适应复杂系统智能作业、海量数据智能挖掘的电网工作实际；④ 复杂系统科学理论、电力系统理论与方法、管理科学理论与方法等，也是透明电网全新场景可靠运转的重要基础支撑。

上述理论与科学方法将支持突破透明电网关键技术体系，可从4个层面分别构建透明电网基础框架：① 感知层，多参量智能微纳传感作为透明电网的根基，是“透明”数据构建的源头；② 通信层，高效、可靠、安全的通信网络作为海量数据的传输通道，是“透明”数据传递的支撑；③ 平台层，智能终端管控平台及数据平台将为数据提供完备的管理机制，数字孪生建模与融合平台作为透明电网的重要衍生物，是“透明”网络功能的载体；④ 应用层，面向实际业务需求发展AI技术，引入行为科学与数学优化理论，解决透明电网新场景下的实际管理问题。

值得指出的是，传统电网的系列关键技术仍有价值，但需针对透明电网新场景演进升级（见图2）。

## （二）透明电网涉及的理论与科学方法

### 1. 复杂系统科学理论

与透明电网发展建设相关的复杂系统科学理论主要有复杂网络理论 [3,4]、社会物理信息系统理论、多智能体系统理论。① 复杂网络理论旨在解决由概率描述系统对象之间关系的问题，可反映系统

的不确定性，为分析决策提供基础工具并进行复杂网络系统的优化控制；与经典电力系统理论关联结合，可发挥各自的应用优势。② 社会物理信息系统理论旨在解决系统运行水平与性能提升等问题，电网可据此实现计算、通信、精确控制、远程协作、自治等功能，进而实现电网生态中能量流、人才流、信息流的协调统一。③ 多智能体理论旨在解决电力系统组织、决策的形态问题，将大而复杂的电网系统拆分为规模较小、互相通信、易于协调和管理的系统，据此实施分布式计算，分布式预测、监控及诊断，分布式智能决策，协调专家系统等功能。

### 2. 电力系统理论与方法

与透明电网发展建设相关的电力系统理论与方法主要有现代控制理论 [5]、可再生能源系统分析方法。① 现代控制理论旨在解决多变量、非线性、时变系统中的相关基础问题，以现代控制技术为手段，实现电网的智能化运行，提高电网运行效率和稳定性。② 可再生能源系统分析方法旨在解决多能分布式优化问题 [6]，针对大量可再生能源接入后电网具有不确定性和波动性的特点，建模能量枢纽、多能流网络，建立分布式运行与控制系统，利用算法优化运行策略实现多能协调运行和分布式协同调控，最终实现多能协同。

### 3. 网络理论与方法

与透明电网发展建设相关的网络理论与方法主要有网络价值理论、物联网理论 [7]、网络分析方

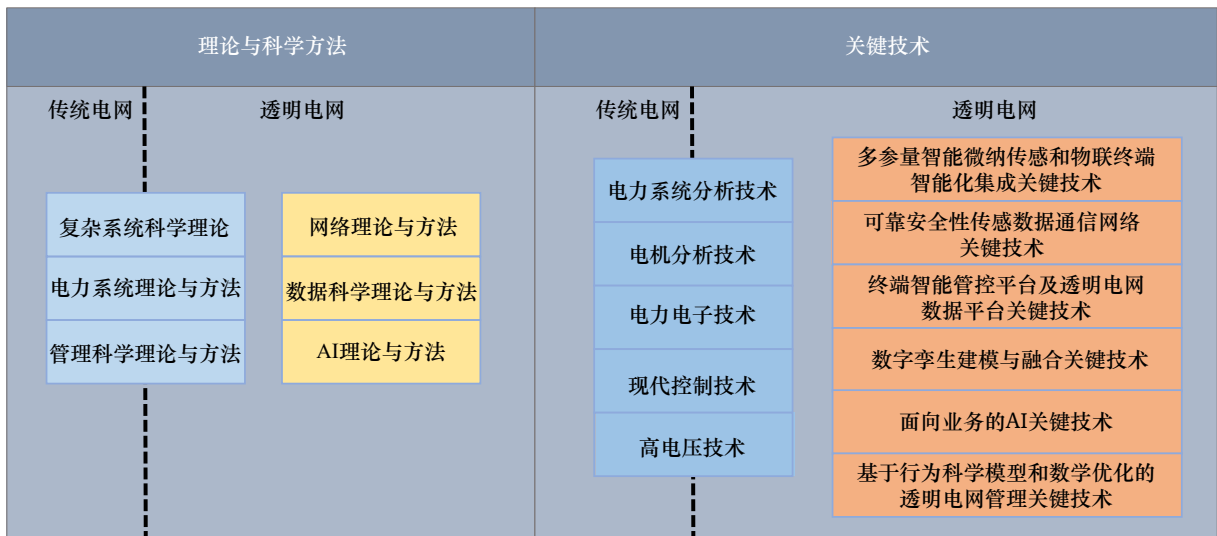


图2 两类电网的关键科学与技术体系比较

法。① 网络价值理论提供了一种可衡量透明电网价值的方法。小微传感器的推广应用，使得电力设备的物理状态及环境信息成为电力网络中的节点；支持实现电网状态的全面感知，设备健康、环境状态的在线实时智能感知，据此形成故障诊断和运维决策以提高系统供电可靠性。② 物联网理论旨在解决电力系统的运行稳定性、电力传输优化的连续性问题，借助通信网络进行设备的互联互通，与软件算法结合实现数字建模、实时分析，与AI技术结合实现智能决策优化。③ 网络分析方法旨在解决网络数据分析的问题，对网络传输的数据进行检测、分析、诊断，协助排除网络事故以规避安全风险，提高电力网络性能并增大可用价值。

#### 4. 数据科学理论与方法

数据科学 [8]以统计学、机器学习、数据可视化等为理论基础，结合领域知识开展数据加工、数据计算、数据管理、数据分析、数据产品开发等应用，最终从数据中提取有价值的知识。在透明电网中，小微传感器广泛分布，大量用户依托云平台开展业务，拥有海量的数据且待挖掘的数据价值潜能丰富 [9,10]。数据科学支持透明电网生态中的各类企业用户从数据中获取价值，为企业运营决策提供

精准信息；以数据贯通推动业务流程贯通，实现电网各环节信息的高度互联与数据共享，促进跨部门、跨专业的高效协同。

#### 5. AI理论与方法

AI理论与方法是智慧能源的核心支撑技术，适用于高维、时变、非线性问题的强优化处理。透明电网中重复性业务众多，具有专家知识的AI系统在代替人力完成繁冗工作、降低人为操作失误方面极具潜力 [11]；对具体数学模型依赖程度低，基于数据的自学习、迁移学习能力尤为突出 [12]。AI理论与方法支持实现透明电网发展建设所需的智能传感与物理状态相结合、数据驱动与仿真模型相结合、辅助决策与运行控制相结合等能力，保障复杂电网系统构建与可靠运行（见图3）。

#### 6. 管理科学理论与方法

管理科学理论与方法旨在增强电网企业综合管理能力，主要有运筹学、生产计划和管理、决策分析、行为科学、计算机仿真 [13]等。例如，基于以运筹学为代表的数学优化理论，研究管理对象特征及其运行规律，抽象出高置信度的数学模型，据此基于充分信息进行综合分析；这与透明电网中信息的透明、无阻流通高度对应 [14]。

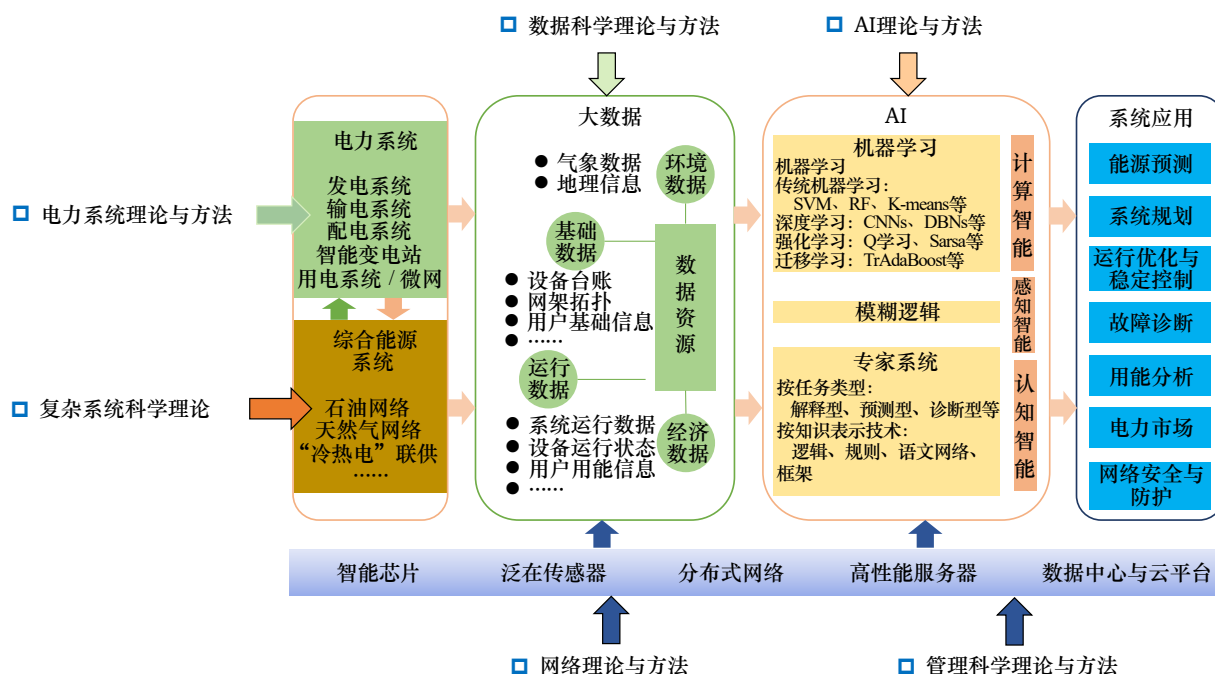


图3 电力系统、综合能源系统、大数据、AI及系统应用需求的关系

注：SVM表示支持向量机；RF表示随机森林算法；K-means表示K均值算法；CNNs表示卷积神经网络；DBNs表示动态贝叶斯网络；Sarsa表示强化学习算法；TrAdaBoost表示一类迁移学习算法。

## 五、透明电网关键技术与基础装备

### (一) 透明电网关键技术

透明电网技术体系主要包括感知层、网络层、平台层、应用层上的关键技术（见图4）。

#### 1. 感知层关键技术

感知层旨在为透明电网的建设运行提供信息采集服务，关键在于构建由多参量智能微纳传感组成的物联终端智能集成系统 [15]。多参量传感器与多通道等技术叠加，进行多参量采集以提高信息的透明度与可靠性，增强信息价值、延长感知周期、降低部署与维护成本。智能微纳传感器以过纳米工艺芯片、纳米材料技术为支撑，缩小传感器的体积以提高传感场景的通用性与空间利用率，提升传感终端的自维护、自学习能力，参与智能反馈与辅助决策。

#### 2. 网络层关键技术

突破网络基础设施的广泛铺设与连接稳定、通信传输安全 [16]、信息高速传输等技术，适应通信

网络的广覆盖、高可靠、低延时要求。综合网络规划、设计、维护等方面涉及的通信标准与协议、网络安全防护、数据传输保障等关键技术，建设传感数据通信网络。保障数据接入数量与质量，保护数据的隐私性和安全性，改善信息的应用范围与应用效率以提高数据应用价值；降低信息传输过程中的潜在风险，减少数据损失。

#### 3. 平台层关键技术

一是终端智能管控平台与透明电网平台关键技术。智能终端提供感知功能，旨在提供目标信息以辅助决策，从而需要接受透明电网的管控。智能管控平台计及终端工作环境、电网实时需求等约束，利用 AI 等技术对海量智能终端的工作状态进行管控 [17]。智能终端提供了海量多源异构数据的接口，获得的大数据是透明电网的重要资产。运用新一代数据库、分布式存储等技术 [18]，高效组织、存储、处理数据；运用检索引擎等技术，快速获取所需数据以加速后续开发流程。此外，数据平台衍生出数据分析、数据挖掘等应用，



图4 透明电网技术体系总体框架



不仅支持开展透明电网业务，而且反馈数据采集与处理的全流程。

二是数字孪生建模与融合关键技术。数字孪生模型源自压缩后的真实物理系统，筛选突出特征并重构对应的数字化模型，应针对透明电网各环节特点，研究不同特征压缩方法，选取最优方法构建虚拟模型。数字孪生充分利用实时数据及历史数据资源，将数字化模型和物理系统进行虚实同步，通过实时态势感知、超实时仿真等过程构造动态虚拟数字模型 [19,20]。搭建数字孪生平台，形成可拆解、可转移、可修改、可重复操作的数字镜像，辅助操作人员深入理解电网物理实体；开展现状评估、历史诊断、未来预测，以各种可能性的充分模拟来支持全面决策。

#### 4. 应用层关键技术

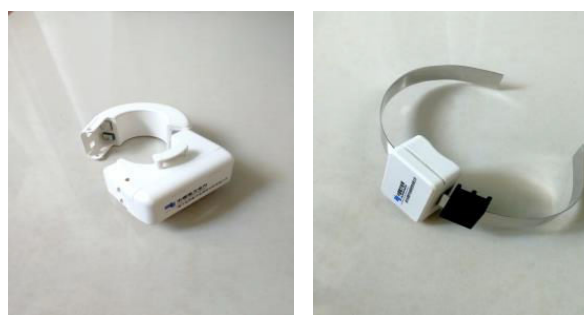
一是面向业务的AI关键技术。针对透明电网业务的智能快速响应需求，面向业务的AI关键技术 [21]，即动态电力知识图谱与AI技术相结合具有系统解决问题的能力。电力知识图谱将各个电力业务对象的百科知识、业务数据、行业规范、行业标准、相关流程等信息，基于图数据结构而形成关系网络；随着业务的展开、数据的增加，电力知识图谱不断自适应进化并形成动态知识图谱。以机器学习、深度学习等为代表，AI技术对数据进行表征学习，深度挖掘并解读动态电力知识图谱；选取信息关系作为切入点，充分实现知识特征的整合、分析和判断。

二是基于行为科学、数学优化的透明电网管理关键技术。利用行为科学理论和数学优化理论建立基于数据驱动的数学管理模型，追求高效管理，创造管理价值 [22]。透明电网感知层中的多参量小微传感器为电网数据采集提供基础条件，进一步拓宽传统意义上的传感器应用场景。运用运筹学、统计学等数学优化理论，寻求透明电网数学管理模型的最优解。数学优化、行为科学模型与信息通信技术的有机结合，提高实际管理问题的处理能力、增强决策的科学性和可靠性。

### (二) 透明电网基础装备

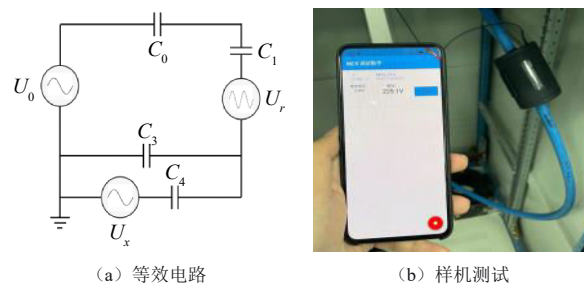
包括南方电网公司数字电网研究院在内的我国电力装备企业，积极研发智能化的电力基础装备，为透明电网建设运行筑牢了基础条件。①在粘贴型微型智能电流传感器方面，已有卡扣式、抱箍式（见图5）

两种型号投入工业生产。②在微型智能电压传感器方面，形成了基于位移电流/分布电容分压与标准信号源相结合的电压测量方法（见图6）。③在“五合一”智能电气量集成传感器方面，集成电压、电流、频率、功角等电气量测量与对时功能（见图7）。④在智能变压器方面，将微纳智能机器人（传感器）植入到变压器内部，据此自动巡检变压器油、内部绝缘等状态，实现变压器内部状态的数据获取与精准预测（见图8）。⑤在透明输电线路方面，将智能传感器布置到输电线路和铁塔以实现全状态监测并实时呈现线路状态（见图9）。⑥在芯片化保护



(a) 卡扣式 (b) 抱箍式

图5 微型智能电流传感器



(a) 等效电路 (b) 样机测试

图6 微型智能电压传感器

注： $U_0$ 表示待测电压； $U_r$ 表示传感器内部串接的标准信号源的电压； $U_x$ 表示临近导体的电压； $C_0$ 表示待测电缆中的导体与传感器之间的电容； $C_1$ 表示串接的分压电容； $C_3$ 表示传感器外壳对地的分布电容； $C_4$ 为外壳对临近导体的分布电容。



图7 “五合一”智能电气量集成传感器



图8 智能变压器



图9 透明输电线路

方面，成功研发 110 kV / 220 kV / 500 kV 芯片化保护装置，实现了装置无防护安装（见图 10）。

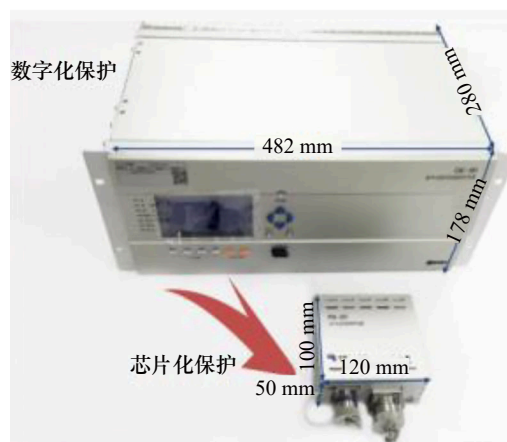
## 六、透明电网发展建议

### （一）以“透明电网新基建”为核心，推动能源低碳转型，构建安全高效的现代能源体系

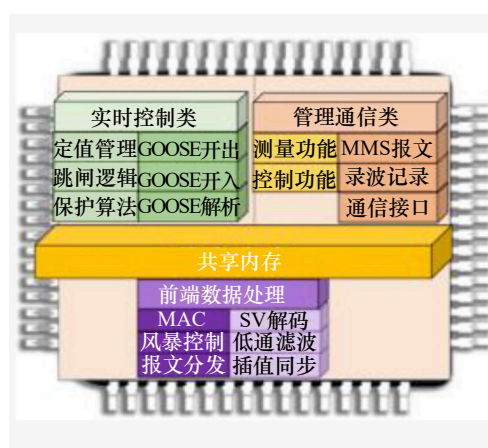
以现代电力能源网络、新一代信息技术为基础，通过不同维度（点、线、面）的小微智能传感器，结合物联终端、通信网络、工业软件、大数据、AI、云计算等技术，“由表及里”实现电网的可见、可知、可控，从时间、空间、业务等产业链价值维度进行全景展示、智慧运营、灵活调控、便捷应用。

通过全系列小微智能传感器、智能装备、工业软件、数据网络等技术的研发和应用，深度融合能源电力企业的业务与管理，形成新型能源生态，全面支撑能源生产、输配电、用电以及新兴的综合能源服务。

围绕透明电网的新型能源生态系统应用互联网理念、“大云物移智链”等先进技术，对现有分散的系统及平台进行整合与创新，加强“源网荷储”全链条感知与控制，打破运行控制与运营管理的业务壁垒；牢牢掌握海量终端用户及其运行的大数据，实现能量流、业务流、数据流的透明化管控；



(a) 保护装置尺寸



(b) 芯片功能示意

图10 芯片化保护装置

注：GOOSE 表示面向通用对象的变电站事件；MMS 表示制造报文规范；MAC 表示介质访问控制；SV 表示采样值。

发挥资源优化配置作用，形成电力市场驱动的大电网能源生态圈。

### （二）开展科技专项攻关，建立“透明电网”关键技术装备体系

建议实施小微智能传感器科技专项，系统突破小微智能传感器的设计、制造与应用。循序渐进实施基础科学的交叉研究，升级精密仪器制造全产业链，打磨优化传感器的应用场景。研究纳米器件、多通道 / 多参量采集、多传感信息融合等技术，支持突破传感器小型化、多功能集成化难题，提高多场景适用性；攻克传感取能技术，研发新型智能芯片，发展具有自供电、自维护、自学习能力的传感器，实现多方式融合供电、“即贴即用”等技术的跨越。

建议实施与国家工业互联网对接的软件系统科技专项,着力突破大型工业软件架构设计、开发自动化、运行维护管理等技术瓶颈,为透明电网提供充分的自动化、智能化能力支撑。运用“大云物移智链”等技术,建设云平台、大数据平台、物联网平台、AI平台等基础性技术平台;重点发展物理电网的数字建模、超实时仿真、孪生共智等技术,满足复杂时空约束条件下的透明电网实际应用需求。

建议实施透明电网智能装备科技专项,着力突破电力电子、智能材料、智能终端、小微智能传感器等关键技术;实现对海量数据的充分利用和电网硬件系统的全面智慧化,保障能源电力系统的安全、可靠、经济运行。

建议实施数据驱动的电力增值服务科技专项,着重解决数据全生命周期管理、数据价值挖掘等行业难题。注重提升海量应用数据的价值密度,形成多源异构数据的算法设计、大数据挖掘等能力;构建能源系统管理平台、客户服务平台、调度运行平台、企业管控平台,整合电网业务的内外要素,形成具有核心竞争力的运行体系,支撑透明电网业务的高效实施。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** April 5, 2022; **Revised date:** May 16, 2022

**Corresponding author:** Yang Lin is an associate professor from the School of Electric Power, South China University of Technology. His major research field is the safety assessment and defense strategy of power transmission and transformation equipment under climate change. E-mail: eplyang@scut.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of the New Internet Plus Action Plan under the New Era and New Situation” (2021-XZ-24)

#### 参考文献

- [1] 新华网. 习近平在气候雄心峰会上的讲话 [EB/OL]. (2020-12-12)[2022-03-15]. [http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-12/12/c\\_1126853599.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-12/12/c_1126853599.htm). Xinhua Net. Xi Jinping's speech at the Climate Ambition Summit [EB/OL]. (2020-12-12)[2022-03-15]. [http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-12/12/c\\_1126853599.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-12/12/c_1126853599.htm).
- [2] 中国南方电网有限责任公司. 南方电网公司发布白皮书 数字电网推动构建新型电力系统 [EB/OL]. (2021-04-27)[2022-03-15]. [https://www.csg.cn/xwzx/2021/gsyw/202104/t20210427\\_319255.html](https://www.csg.cn/xwzx/2021/gsyw/202104/t20210427_319255.html). China Southern Power Grid. China Southern Power Grid releases white paper on digital power grid promoting the construction of new power system with new energy as the main body [EB/OL]. (2021-04-27)[2022-03-15]. [https://www.csg.cn/xwzx/2021/gsyw/202104/t20210427\\_319255.html](https://www.csg.cn/xwzx/2021/gsyw/202104/t20210427_319255.html).
- [3] 魏震波, 苟竞. 复杂网络理论在电网分析中的应用与探讨 [J]. 电网技术, 2015, 39(1): 279–287. Wei Z B, Gou J. An overview on application of complex network theory in power system analysis [J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 279–287.
- [4] 王钰楠, 杨镜非, 何也帅, 等. 基于复杂网络理论的主动配电网多级运行风险快速评估 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 65–71. Wang Y N, Yang J F, He Y S, et al. Rapid assessment of multi-stage operation risk of active distribution network based on complex network theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 65–71.
- [5] 魏鞅, 梅生伟, 张雪敏. 先进控制理论在电力系统中的应用综述及展望 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 143–153. Wei W, Mei S W, Zhang X M. Review of advanced control theory and application in power system [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 143–153.
- [6] 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 S H, Sun Y, Niu X N, et al. Energy Internet system based on distributed renewable energy generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 104–108.
- [7] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究 [J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1023–1029. Qian Z H, Wang Y J. IoT technology and application [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1023–1029.
- [8] 林文辉. 基于Hadoop的海量网络数据处理平台的关键技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学(博士学位论文), 2014. Lin W H. Research on key technologies of massive network data processing platform based on Hadoop [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications(Doctoral dissertation), 2014.
- [9] 赵俊华, 董朝阳, 文福拴, 等. 面向能源系统的数据科学: 理论与技术与展望 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 1–11. Zhao J H, Dong Z Y, Wen F S, et al. Data science for energy system: Theory, technology and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 1–11.
- [10] 李刚, 张博, 赵文清, 等. 电力设备状态评估中的数据科学问题: 挑战与展望 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 10–20. Li G, Zhang B, Zhao W Q, et al. Data science issues in state evaluation of power equipment: Challenges and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 10–20.
- [11] 杨挺, 赵黎媛, 王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 2–14. Yang T, Zhao L Y, Wang C S. Application of artificial intelligence in power system and integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 2–14.
- [12] 汤奕, 崔晗, 李峰, 等. 人工智能在电力系统暂态问题中的应用综述 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 2–13. Tang Y, Cui H, Li F, et al. Review on artificial intelligence in power system transient stability analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 2–13.

- [13] 盛昭瀚, 张维. 管理科学研究中的计算实验方法 [J]. 管理科学学报, 2011, 14(5): 1-10.  
Sheng Z H, Zhang W. Computational experiments in management science and research [J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(5): 1-10.
- [14] 郭皓池. 智能电网中基于负荷分析的需求侧管理体系发展研究 [D]. 北京: 华北电力大学(博士学位论文), 2014.  
Guo H C. Research on the development of demand side management system based on load analysis in smart grid [D]. Beijing: North China Electric Power University(Doctoral dissertation), 2014.
- [15] 荆孟春, 王继业, 程志华, 等. 电力物联网传感器信息模型研究与应用 [J]. 电网技术, 2014, 38(2): 532-537.  
Jing M C, Wang J Y, Cheng Z H, et al. Research and application of sensor information model of power Internet of things [J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 532-537.
- [16] 谢尧, 吴柳, 张思拓, 等. 基于大数据的电力通信网的安全防护系统及实现 [J]. 电子设计工程, 2017, 25(19): 131-135.  
Xie Y, Wu L, Zhang S T, et al. Realization of security protection system for power communication network based on big data [J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(19): 131-135.
- [17] 蔡勇. 数据挖掘技术在电网运营监控平台建设中的研究与应用 [D]. 上海: 上海交通大学(硕士学位论文), 2012.  
Cai Y. Research and application of data mining technology in the construction of power grid operation monitoring platform [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University(Master's thesis), 2012.
- [18] 王雷. 面向分布式数据库的连接查询优化 [D]. 上海: 华东师范大学(硕士学位论文), 2017.  
Wang L. Connection query optimization for distributed database [D]. Shanghai: East China Normal University(Master's thesis), 2017.
- [19] 沈沉, 贾孟硕, 陈颖, 等. 能源互联网数字孪生及其应用 [J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 1-13.  
Shen C, Jia M S, Chen Y, et al. Digital twin of energy Internet and its application [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 1-13.
- [20] 唐文虎, 陈星宇, 李立涅, 等. 面向智慧能源系统的数字孪生技术及其应用 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 74-85.  
Tang W H, Chen X Y, Li L C, et al. Technologies and applications of digital twin for developing smart energy systems [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 74-85.
- [21] 闪鑫, 陆晓, 翟明玉, 等. 人工智能应用于电网调控的关键技术分析 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 49-57.  
Shan X, Lu X, Zhai M Y, et al. Analysis of key technologies for artificial intelligence applied to power grid dispatch and control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 49-57.
- [22] 林杰. 电力安全生产管理应引入和应用安全行为科学理论 [J]. 贵州电力技术, 2006, 9(11): 80-82.  
Lin J. Application of scientific theory of safety operation in safety management of electric power production [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2006, 9(11): 80-82.