



智慧能源的产业逻辑与技术发展趋势

文/蒋晓健¹ 张 十¹ 肖亚平¹ 芦 强¹ 孟彦辉² 宋鹏飞³ 冯玲玲¹

1. 中国机械工业联合会能源互联网设备与技术分会；2. 机械工业发电设备中心；3. 山东省工业和信息化研究院

分析了电力系统的问题、成因和用户电价构成，指出智慧能源可通过处理供给侧有序和用户侧无序矛盾，为电力系统的整体效率提升提供重要的技术支撑；给出了智慧能源经济性评估模型，表明在智慧能源语境下，供给侧和用户侧的经济性评估需统筹考虑多种能源的实际经济价值；提出了基于经济性的智慧能源技术发展趋势。

自2014年至今，智慧能源逐步成为能源与能源技术装备行业重要的发展趋势：诸多关联的概念不断出现，如综合能源、能源互联网、微电网、微能源网、泛在电力物联网、能源物联网和源网荷储系统等；主管部门也给予了许多鼓励政策，并安排了多个示范项目。但到目前为止，智慧能源成功落地的项目仍然鲜见。因此，深入研究智慧能源的产业逻辑和技术发展路线十分必要。

智慧能源的发展历史

到目前为止，智慧能源以及相关术语均采用描述的方式进行定义，是开放式的。从历史发展的角

度看，智慧能源是信息技术、网络技术、智能技术与工业技术深度融合后在能源领域的具体实践。

1. CPS

2006年，美国国家基金委员会提出了信息物理系统（CPS）概念。CPS是高度融合了计算、通信和控制三大技术的可控、可信和可扩展的网络化物理设备系统，可视为“现实世界-数字世界”的互动框架。在数字世界中，系统的推演、仿真和优化成本远低于真实世界。通过“现实世界-数字世界”的不断交互，可有效提升现实世界中各种系统的运行效率。因此，CPS被视为不同行业智能化系统的理论基础。智能制造、智慧城市、智能电网、智慧能

源和能源互联网等均为CPS在不同领域中的具体实践和发展。

2. 从智能电网到智慧能源

智能电网概念首见于2006年欧盟理事会的能源绿皮书《欧洲可持续的、竞争的和安全的电能策略》。随后数年，欧、美、中分别提出了自身的智能电网技术体系。2010年1月12日，国家电网公司制定了《关于加快推进坚强智能电网建设的意见》，确定了建设坚强智能电网的基本原则和总体目标。2015年，国家能源局印发《配电网建设改造行动计划（2015—2020年）》，启动了长达6年的配电网改造工程。

早期智能电网建设的驱动力是解决电网自身的发展问题，主要目标是提升传统电网自身的能力，主要解决输配电灵活性和安全性的问题（这也是智能电网被称之为Smart Grid的原因）。如2010年IEC SG3发布的《IEC智能电网标准化路线图》v1.0中，将IEC 61850、IEC 61970和IEC 61968等确立为智能电网核心标准；国家电网的智能电网技术标准涵盖了发电、输电、变电、配电、用电、调度、信息通信和综合规划8个专业方向。典型的技术路线包括数字化变电站、柔性输变电技术、配电自动化和特高压技术等。在此阶段，尽管各国智能电网建设也开展了用户侧的部分工作，但并非重点，进展不大。

早期智能电网技术聚焦于两个方面：一是柔性输变电技术，该技术主要通过柔性无功补偿和潮流优化，提高输配电效率和灵活性；二是提高输变电电压等级以及电网互联（特高压、骨干网互联和配电网改造），旨在提高输变电效率和电网安全性。

中后期智能电网的发展面临两个主要问题：一是可再生能源大规模接入带来的波动性影响；二是需适应能源的多元化发展。具体技术方向主要包括：一是在电源侧，提高电源接入的技术要求，调控接入电源功率；二是在用户侧，通过负荷预测、需求响应等技术，尽可能预测、调整用户用能行为，以减轻电网的调度压力；三是大规模部署各类储能设施，以提高系统的调节能力。此时，智能电网已经逐步向智慧能源系统转变。

智能电网是电力系统智能化的1.0版本，智慧能源可视为2.0版本。以历史发展的角度看，从智能电

网到智慧能源的过渡十分自然：智能电网阶段，核心在于优化无功功率，以提升电网传输性能；在智慧能源阶段，核心在于处理有功功率问题，即采用更多元的技术手段，解决供给侧有序和用户侧无序的矛盾。

智慧能源的发展策略

CPS的提出和被广泛应用，其内在逻辑在于技术性和经济性的一致性，即CPS通过提升物理世界各系统的效率，使用户可以获得更好的经济效益和社会效益。智能电网的实践表明，无论是存量电网扩容改造，亦或是特高压线路建设，都符合技术可行、经济可行的规律，因此得以推广。

智慧能源同样也需要找到技术性和经济性一致的发展路径。但智慧能源面临更为严峻的挑战：一是单纯电源和电网的智能化改造，并不能完美解决供给侧有序和用户侧无序的矛盾，必须要对用户侧系统进行智能化改造升级；二是用户侧系统涉及的资产，分属于各类市场主体，难以通过集中式建设的模式开展工作，必须引入市场化驱动力；三是政策和机制的滞后性，阻碍了智慧能源的发展。用户侧系统建设是完全市场化的，项目的技术方案需按照当前的市场机制来确定投资回报率，因此部分高级且有效的技术，很难在当前的市场环境中发挥作用。

1. 电力系统存在的主要问题

目前电力系统面临以下三大挑战：一是如何有效提升电力系统运行效率，有效降低能源成本；二是如何实现大规模出力波动电源安全消纳，如期达到“双碳”目标；三是如何进一步提升能源安全保障能力。

（1）电力系统效率

总的来说，电力系统运行效率偏低，主要表现为：

1) 投入产出比较低。根据中国电力企业联合会相关统计数据显示，1997—2016年，全国电力系统固定资产投资总额约为9.6万亿元，其中电源投资和电网投资占比约为1:1（相关数据未包含光伏电站投资额）；到2021年，我国全社会用电量8.3万亿kW·h。若将整个电力系统视为一个企业，固定资产投资约10万亿元，而年度产出电量仅为8.3万亿kW·h，投

入产出比偏低。

2) 设备利用率低。根据有关文献表明,我国各省市电网在网设备利用率普遍偏低,多数集中在20%~60%区间。2013年云南电网主变压器等效平均负荷率见表1。

表1 2013年云南电网主变压器等效平均负荷率

电压等级	500 kV	220 kV	110 kV	35 kV
全网	26%	22%	22%	26%

分析上述情况的成因,具体如下:

1) 安全责任上移,电网必须按照严格的安全规范投资建设各类设施。如配电网通常需要满足“N+x”安全准则。因此,即便是变压器满负荷运行,最佳效率仍然会局限在50%~90%之间。而变压器实际负载率往往远低于最佳效率。

2) 负荷曲线波动剧烈,负荷平衡责任上移。由于负荷曲线实时波动、日夜峰谷差和季节差普遍存在,所以供给侧需要提供大量备用容量和储能装置等灵活性资源,从而导致设备的冗余投资和低效运行。

3) 风电光伏容量占比越来越高,进一步增加对灵活性资源的需求。

需要指出的是,电力系统的低效率主要是传统交流电网的结构和运行特征所决定的,而非人为因素,因此,不能通过管理来提效,必须使用创新的技术手段和组织模式。

(2) 工业用户的电价

工业企业往往承担着远超名义度电电价的电费支出。根据2014年上海市电力公司电费数据实证研究表明,在名义加权电价为0.752元/(kW·h)情况下,29 446户10 kV工商业及其他各类用户平均电价支出为1.101 2元/(kW·h),其中:低负荷率用户(61.1%)电价支出为1.594 2元/(kW·h),中负荷率用户(30.6%)电价支出为0.999 6元/(kW·h),高负荷率用户(8.3%)电价支出为0.867 6元/(kW·h)。上述用户电价支出与名义电价之间的差额来源于需量/容量电费。用户负荷率越高,需量/容量电费平摊至度电上的电费越低。对于大部分工业企业(常日班制或两班制企业),通常将承担更高的电费支出。

同样需要指出的是,对于用户而言,容量电费

支出也是合理的,这部分的费用,对于用户而言,应视为供电线路的月租费;对于电力企业而言,相当于供电设备的折旧费。因此,容量电费支出是不可避免的。

2. 智慧能源的发展策略

智慧能源需从供给侧和用户侧两端发力,根据彼此不同的技术特点,通过智能化手段,予以改造和创新,使之同时满足技术可行和经济可行的要求。可行的策略为“终端智慧赋能、分层有限平衡、分散安全责任、多能协同发展”,即以电网为中心,将电源等供给方和用户方系统均视为电网的接入终端(微电网);不同终端主体均需具备一定的微电网平衡/自治能力,以实现电网的友好接入;多能协同/多能互补主要在各终端微电网内实现。

(1) 供给侧智慧能源系统

供给侧智慧能源系统可视为一个多能互补系统,即能源企业可因地制宜将火、水、风、光、储等装置互补后打捆上网,目前主要使用火电、储能(包括电化学储能和抽水蓄能)作为灵活性资源。

2020年以来,国家发改委、国家能源局以及相关省市等多个政府部门出台了包括风电光伏新增项目需配套储能设施、全面开展抽水蓄能电站建设及煤电机组灵活性改造等多项政策措施,均是从电网和电源侧来解决上述问题。

(2) 用户侧智慧能源系统

以工业用户为例,典型的用户侧智慧能源系统应包括三个部分:多能互补系统、负荷管理系统和网内平衡调度平台。如图1所示。

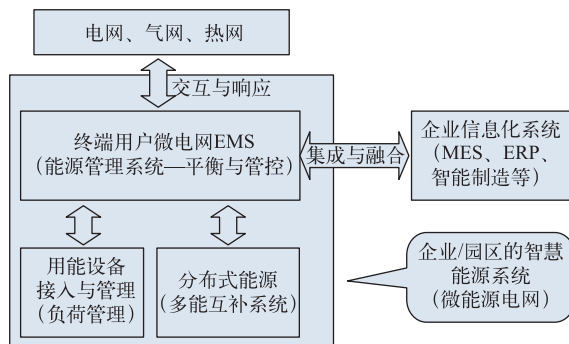


图1 典型的用户侧智慧能源系统

用户侧智慧能源系统最重要的特征是“有限自治,友好并网”,具体为:

1) 从设备接入角度看,用户的EMS可接入各类

用能设备和供能设备，构成一个智能化的自主终端。

2) 从平衡调度逻辑看，EMS根据生产生活所需，在微电网内部进行一次平衡，以平滑用户的负荷曲线/出力曲线，若用能仍有缺口/富余，再与外部能源网络通过能量交换进行二次平衡。

3) 从外网和微电网互动逻辑看，用户侧智慧能源系统可视为一个小型的虚拟电厂。

有限自治的用户侧智慧能源系统，对于工业企业和电网而言，都具有重要意义和价值。对于工业企业而言，通过有效管控各类设备，一是可有效降低企业的容量/需量需求；二是可有效挖掘可再生能源消纳潜力；三是可有效降低设备运维成本，减少管理费用。对于电网而言，一是友好并网的用户可灵活响应电网调度，降低对备用资源的需求；二是可提高电力设备利用率和电力系统运营效率；三是可有效提升可再生能源消纳能力。

$$\text{度电成本} = \frac{\text{年度成本}}{\text{电量}} = \frac{\sum_{\text{供电装置}} (\text{折旧支出} + \text{燃料成本} + \text{维护成本} + \text{管理成本} + \text{资金成本})}{\sum_{\text{供电品类}} \text{供电装置功率} \times \text{实际等效利用小时数}} \quad (1)$$

此模型的特点是：

1) 将多能互补系统视为一个整体进行经济性评估，其中包含储能设施。

2) 备用容量的成本，以实际等效利用小时数、折旧支出、燃料成本和维护成本等指标项予以体现。

$$\begin{aligned} \text{用户自供电成本} &= \frac{\text{年度成本}}{\text{年自供电量}} \\ &= \frac{\sum_{\text{供电装置}} (\text{折旧支出} + \text{燃料成本} + \text{维护成本} + \text{管理成本} + \text{资金成本}) - \text{部分容量费}}{\sum_{\text{供电品类}} \text{供电装置功率} \times \text{实际等效利用小时数}} \end{aligned} \quad (2)$$

有限自治的用户侧智慧能源系统，在评估经济性时，选择的电价指标应为用户的实际电价支出（即名义度电电价+容量电费均摊至度电后的支出）。

与供给侧多能互补系统相比，用户侧智慧能源系统的优势在于：一是结算电价更高；二是通过有效的负荷管控，可降低备用容量和储能设备的投入。但另一方面，用户侧系统因规模小，单一电源成本高于供给侧。

技术发展趋势

降本增效、提高系统经济性是智慧能源技术发展的核心逻辑，其主要发展方向包括以下四个方

智慧能源的经济性评估

1. 电力系统经济性评估的问题

当前电力交易大部分按照“电量+容量”开展，并未计及不同电源发电的特性。这种交易模式，放大了风光电力的显性成本优势，掩盖了其隐性成本。随着可再生能源高比例应用，这一交易模式带来经济性评估的隐患，以供给侧多能互补为例，在风光火储系统中，风光优先发电，火电机组承担最主要的调峰和调频责任，如此必然损害火电机组的发电权，造成火电机组效益损失。又如，独立的风光电站并网，即便是平价上网，风光电站仍然获得了隐性收益——调峰调频的成本支出。因此，在能源多元化趋势下，单一品类的经济性评估方式必须改变。

2. 供给侧多能互补系统经济性评估模型

多能互补系统的经济性评估模型公式为

很显然，多能互补系统在计及火电深度调峰和大规模储能成本后，若需平价上网，风光成本须远低于当前的脱硫标杆电价。

3. 用户侧智慧能源系统经济性评估模型

仅以电力成本为例，用户侧智慧能源系统经济性评估模型公式为

面：一是接入设备“可接入、可调、可控”；二是低成本微电网集成与通信技术；三是供给侧和用户侧典型解决方案；四是高效小型化能源装备技术。

1. 供给侧智慧能源系统

供给侧智慧能源系统技术发展趋势包括火电灵活性改造技术、高效率智能化风电光伏技术、供给侧多能互补技术装备、虚拟电厂技术装备、长寿命低成本储能技术等。

2. 用户侧智慧能源系统

用户侧智慧能源系统技术发展趋势包括四个方面。

1) 面向微电网环境的高效小型化供能和储能设备，包括分布式光伏技术产品、光伏建筑一体化产

品、分散式风电技术产品、高效小微燃机及多联供技术装备、宽温度区间冷热设备和长寿命低成本储能设备等。

2) 负荷管控技术装备(柔性负荷),包括远动开关、基于变频的功率管理技术与设备(即具备可变工况的各类用能设备,如节能照明技术装备、变频电动机拖动的各类设备、频率感应电炉和可控功率的充电设施等)。

3) 面向微电网环境的电力自动化技术。如基于微电网的调度技术、谐波治理、继电保护和电压暂降治理技术等。

4) 典型应用场景的典型应用方案。重点推动流程型行业应用,如石化、水务、冶金、酿酒和医药等行业应用;同时着重突破离散型制造业的智慧能源应用,如汽车行业。

3. 共性技术

亟需发展的共性技术包括微电网规划设计调度仿真软件平台与开发工具、通信与数据交换技术、设备接入技术装备、微电网内部调度平衡技术与设备、多能流转换技术与设备、能源/电力交易技术与设备及智慧能源与智能制造系统的融合技术等。

结束语

“十四五”是现代能源体系建设的关键阶段。随着风电、光伏的高比例接入,电网压力日益增加。智慧能源是现代能源体系最重要的技术路线之一,值得高度重视。

本文通过分析电力系统存在的问题,以经济性为切入点,提出了智慧能源的产业发展逻辑,并进一步提出了相关技术发展方向。文章认为智慧能源

是大势所趋,但需从终端智能化入手,通过综合运用多种技术,形成技术可行、经济可行的典型解决方案。

参考文献

- [1] GREEN PAPER on a European strategy for sustainable, competitive and secure energy [EB/OL]. http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy/doc/2006_03_08_gp_document_en.pdf.
- [2] 国家能源局. 关于印发配电网建设改造行动计划(2015—2020年)的通知[A/O]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto84/201508/t20150831_1958.htm.
- [3] 陈树勇, 宋书芳, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
- [4] 国家电网. 坚强智能电网技术标准体系框架[R]. 2012.
- [5] 中国电力企业联合会. 历年电力工业统计基本数据一览表. <https://cec.org.cn/menu/index.html?542>.
- [6] 王健. 云南电网输变电设备利用率分析研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [7] 刘洪, 杨卫红, 等. 配电网设备利用率评价标准与提升措施[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 419-423.
- [8] 刘思强, 姚军, 等. 我国销售电价交叉补贴方式及改革措施—基于上海市电力户控数据的实证分析[J]. 价格理论与实践, 2015(8): 26-28.
- [9] 袁敬中, 谢景海, 许颖, 等. 基于全息数据的变电智慧设计方法研究及应用[J]. 电气应用, 2022, 41(9): 38-48.

