

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.002

# 分布式供能系统协同电网调峰是历史的必然

华贲

(华南理工大学 天然气利用研究中心, 广州 510640)

**摘要:** 基于工程项目的经济分析提出的天然气分布式冷热电联供能源系统 DES/CCHP 昼开夜停协同电网调峰、实现互利双赢的集成创新, 展望了可再生能源为主的互联网 + 智慧能源时代能源系统的新架构和电力供需时变性的新挑战, 论证了作为能源互联网基础单元的 16 h/d 运行的 DES/CCHP 和带储电的光伏为主的 DES 将成分别成为电网昼夜调峰和随机调峰的主力, 并指出电力交易的市场化改革、与 DES 同步的微电网建设和配电网改造, 以及建立在互联网、大数据、云计算和人工智能的基础上 SG 和 IEN 系统的建设是实现电力供需平衡的决定因素。

**关键词:** 分布式冷热电联供; 分布式光伏; 电网调峰; 智慧能源网络

中图分类号: TM61

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0008-05

## Distributed Energy System in Coordination with Peak Load Regulation of Power System is Historically Inevitable

HUA Ben

(Natural Gas Research Center, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Based on the integrated creation at synergy of DES/CCHP with grid peak-shaving, which results win-win, the new energy hierarchy and new challenge in grid power-balancing at the era of renewable energy and Internet + Intelligent Energy are foresighted. It is predicted that large-scale DES/CCHP operating as 16h/d and photovoltaic-based small-scale DES with power-storage will be the main approaches for the day/night and stochastic grid power-balancing respectively. Finally, it is pointed out that reform towards marketing mechanism for electricity trading, intelligent micro-grid constructing and distribution network reforming, as well as the march towards Smart Grid and Energy Internet by mean of Internet, Big-data, Cloud Computing and Artificial Intelligent, are the determined factors.

**Key words:** DES/CCHP; distributed photovoltaic; peak load regulation; intelligent energy network

几年前在几篇拙作<sup>[1-6]</sup>中基于多个工程项目的经济分析提出, 分布式冷热电联供能源系统 (Distributed Energy System, DES /CCHP) 昼开夜停 16 h/d 运行、按照分时电价上网是在中国历史条件下解决气电价格倒挂、提高系统经济性的出路和战略创新。因为一方面, 中国大规模发展天然气晚了 30

年, 天然气与煤的等热值比价高于世界平均水平 50% 以上, 致使气电成本畸高。另一方面, DES/CCHP 系统供应的终端工业和建筑物用户, 除了绝大部分自己都附设有热电联产系统的炼油化工、冶金、建材等过程工业之外, 离散制造业和建筑物用电的时间基本上都是 16 h/d, 即早 8:00 到晚 24:00, 后半夜较少用电; 除居住用建筑物空调制冷、供暖外, 热水和蒸汽也基本不用或可藉短时储存保供。这就使 DES/CCHP 系统运行的最佳策略是昼开夜停 16 h/d 运行。这有三个好处: (1) 可以避免系统在低负荷、低效益时段运行; (2) 解决夜间电力富余时段上网、增加电网调峰负担问题; (3) 按照市场经济规律, 电网获得了优质峰、平段电力,

收稿日期: 2016-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51437006)

作者简介: 华贲(1937), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 主要从事能源系统工程研究和工程开发, 包括能量系统优化、天然气利用, 分布式冷热电联供区域能源系统、低碳能源战略等 (e-mail) cehuaben@scut.edu.cn。

又增加了低谷电出路，就应该给予合理的分时电价；这样 DES 系统在没有空调也没有供暖的春秋季节也可以藉调峰和供应生活热水及部分蒸汽而获利或保本运行。这可使系统年运行时数达到 4 800 h/a，从而大大降低了设备折旧费用。按照近年来的多个实际工程项目的经济核算，即使在南方，只要 DES 的上网电价比同时段大工业分时电价低 0.07 元/kWh 就能够经济运行。这样电网既节省了抽水蓄能的调峰费用，又可从无成本的就地转售获得 0.07 元/kWh 的可观利润，绝对是互利双赢。

这个集成创新模式得到了中国电机工程学会领导的支持。本人几次作为中国代表在国际供电会议上发言介绍这一模式，受到与会发展中国家代表的关注，但却无法在国内任何一个项目中试行。本该利用工业化和城镇化机遇在“十二五”普遍推广的区域型 DES/CCHP 这一能源革命重点举措，到如今“十三五”开始仍停滞不前。这是马克思主义政治经济学指出的“生产关系阻碍生产力发展”的典型表现，拖后了我国加速提高能效、减排 CO<sub>2</sub>、消除雾霾以及天然气产业发展的步伐。

一个小故事也许能够反映这种不合理的情况：我国绝大多数气电机组迄今都在调峰运行但无分时电价，亏损由大工业用电户补贴。某 2 台 9E 机组联合循环电站实施 CHP 项目，从汽轮机抽出 30 t/h、0.5 MPa 蒸汽供应邻近 24 h/d 运行的食品厂。按照“CHP 优先”的电力调度“规则”，电网每年须按“标杆电价”为夜间上网的数百兆瓦时无用的低谷电力付出 2 亿~3 亿元。电网公司私下要求以每年白给电站 4 千万元的代价换取电站经理停止 CHP 项目；但是电站不肯，因为卖蒸汽的总经济收益更高。

## 1 碳减排大局倒逼能源革命、低碳转型深化

2015 年的巴黎协议，加速了世界能源低碳转型的步伐。要不了几十年，世界就将进入以可再生能源为主时代。由于可再生能源本身的低能量密度特质和科技进展的加速，到本世纪中叶，世界半数以上的电力将由 DES 分散地联产并与冷热蒸汽等一并就地直供用户，不再通过大电网集输和交易。从第一次工业革命以来逐步形成的集中、单向、垂直的“能源供应系统”（见图 1）转为以智能电网（Smart Grid, SG）为骨架的、基于互联网信息系统的、高

度智能化的分散、双向、扁平的智慧能源网络（Intelligent Energy Network, IEN）也就是能源互联网，见图 2。智能电网将不再仅是集中发电的传输和配送者，更主要是各种电力的集散、交易的平台，以及智能调配、控制以实现实时供需平衡的中枢<sup>[7]</sup>。现有的人工调度不再可能适应由亿万个实时大数据所反映的“瞬息万变”的电力供需变化。而被市场决定的分时电价所驱动的电力流向，和基于大数据、云计算和人工智能所实施的“智能调配”所替代。生产关系终究要适应新的生产力的发展，分时电价是历史的必然。

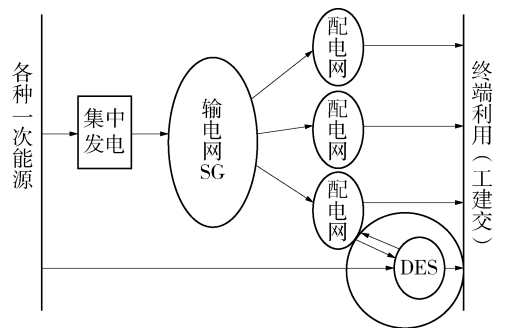
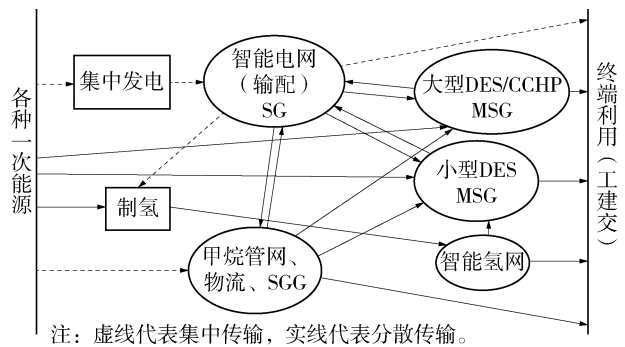


图 1 传统的集中发电和输配系统

Fig. 1 Traditional centralized power system



注：虚线代表集中传输，实线代表分散传输。

图 2 未来能源系统的变化趋势

Fig. 2 Incoming trends of energy system

## 2 两类分布式供能系统将成为能源互联网的基本单元

未来的智慧能源网络，或称能源互联网联结的对象是什么？难道还像现在这样直联、直供每个终端用户吗？不然。未来基于可再生能源的分散性、工业及建筑物用能的分散性，以及尽可能高效率利用自然资源的目标，终端用能向热力学原理所指出的高效 DES/CCHP 演化，是与一次能源低碳化相

互配合、齐头并进的历史进程。预计未来终端用能中电力将占一半,冷热蒸汽占三成多,其余为非电运输驱动力。基于工业园区和大型社区的区域型 DES 多种用户冷暖热电蒸汽需求的高峰时间段交错互补,设备投资小、能效高。但受冷热蒸汽的经济输送距离所限范围最大几十平方公里,与正在工业化和城镇化的中国各地上千个“开发区”吻合。当前以天然气为主力,未来可采用数十兆瓦的太阳能热发电或四代小型核电,以及地热、“干热岩”等一次能源。与集中供暖系统(District Heating System, DHS)和区域供冷系统(District Cooling System, DCS)相结合。主机可达几十兆到百兆瓦级,但仍属分布式。

小型 DES/CCHP 的服务对象可以是一个工厂、医院、学校、商厦、酒店或住区。一次能源包括太阳能、天然气、地热、生物质能、潮汐能、海洋能,风能等。装机容量可以从 1~10 MW 级。以光伏等为主的小 DES 没有基于热力循环的 CCHP,可用热泵或太阳能光热等方式制冷热,如图 3 所示。

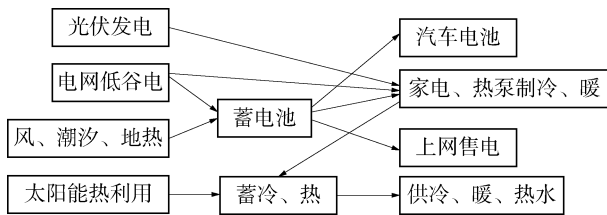


图 3 以可再生能源为主要一次能源的、带储能的小型 DES/CCHP 示意图

Fig. 3 Small DES using renewable energy with energy storage

日前荷兰和丹麦 CHP/CCHP 发电已占总量 50% 以上,美国能源部规划 2020 年达到 29%。未来世界各国的工业、建筑物终端供能都将由亿万个大小 DES/CCHP 所覆盖。少数 DES 未能覆盖、本地可再生能源又不能自给的终端用户,仍可由电网和天然气管网供电和燃料气,用户按传统模式或借助于热泵自己产供冷暖热蒸汽。

### 3 可再生能源时代各类发电和用电的时变特性和对策分析

迄今的化石能源时代,需求侧主要的时变性来自人类“昼作夜息”的生活规律。以供应侧的抽水蓄能和调峰机组为主要调节和适应手段。但在可再生能源时代,估计未来将占总发电量 5~6 成的光伏

发电和风电的时变性和随机性使供应侧自身的时变性大大增加。并且这种时变性与需求侧“昼作夜息”的时变性并不一致。两者叠加起来,就使未来电力供需平衡的局面几乎完全不同于现在。

如上所述,未来一半以上的电力在本身带有储能设施(包括电动汽车等蓄电池)的亿万个光伏为主的小型 DES 和千万个区域型 DES/CCHP 内产生和就地直供,并不需要全部通过大电网。来自供应和需求两侧的大部分电力峰谷差也都将在 DES 内部消化。但因规模容量所限,DES 毕竟难以“孤网运行”。因此,电力供需平衡需要 DES 与 SG 相互支持和协同。

在市场机制下的分时电价所左右的亿万个带储电设施的 DES 追求最大经济效益而在售电还是用电两种模式之间切换的行为,是左右电力供需实时平衡的主要及核心手段。

上述大部分区域型 DES/CCHP 发电主机白天 16/d 运行、夜间 23:00—07:00 停机,夜间用电和制冷时耗用低谷网电。这使将 DES/CCHP 成为协同电网昼夜调峰的主力。

包括集中的大型水电、大型光伏和风电的大电网的供需平衡手段还有以下三个:(1)借助于高端储能子系统,主要是抽水蓄能电站、有水库的非径流水电站等;(2)快速启停和可调负荷的天然气发电可将随机变化的风电和光伏发电整合为可接入电网并长输的稳定/均衡负荷;也可用富余时段的电制气;(3)与本区域之外邻近的 SG 的分时段电力互换。例如丹麦与挪威和瑞典电网的互联主要是以随机性强的风电换取可调控的非径流水电。对外输电能力 6.28 GW 的丹麦,2012 年受入电量 128.66 亿 kWh,送出电量 114.13 亿 kWh,净进口电量仅为 14.53 亿 kWh,仅占全国总耗电量的 4.3%<sup>[8]</sup>。

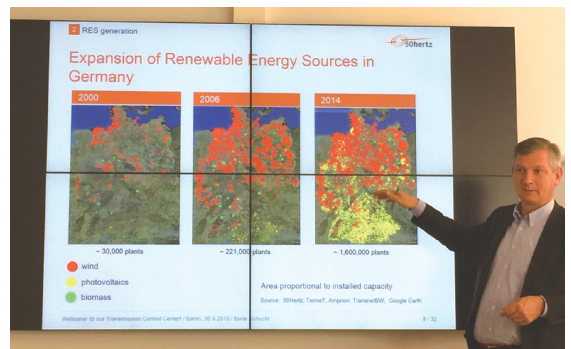
### 4 电网智能化和市场模式的革新是电力供需实时平衡的决定因素——德国的实践

沿袭至今的集中、单向、垂直、垄断的人工电力调度模式显然不可能适应这样瞬息万变的电力格局。这是发展智慧能源网络 IEN,也就是能源互联网的最迫切需求。它建立在大数据、互联网、云计算和人工智能的基础之上。首先要求所有的配电网本身进行智能化改造:设置大量迄今只在输电网

才有的检测仪表和传感器，以获得电源侧和用户侧的所有相关的实时信息数据。其次是借助于集成建模和云计算从这些数据中获得所有亿万个发电源和/或用户的历史、现状和预估走势的曲线。进而基于模拟优化和人工智能技术，在多个可行的电价方案中获得预期各个 DES 市场行为(用电/上网售电)以及上述第3节大电网调峰措施应有的调节力度所能够获得的保持供需平衡的最佳方案。这个方案将给出在一天24 h之内实行几次和怎样的电价调整。从搜集数据—算出走势曲线—给出模拟优化的电价数据和宏观调控举措这个过程，将会在极短的时间内完成。这是人工测量和计算在一年内也无法完成的。

当然，实现实时的供需平衡还需要所有的单元，包括每个 DES 和每个独立联接 SG 的发电源和用电户，都进行智能化改造；就是说它们不仅提供数据，更能够由它们的智能单元自动判断和调整符合其最大经济、能效和碳减排效益的发/用电行为。这就使每个单元都能按照市场机制对电价做出尽可能快的反应。当然，并不是所有的变化因素都是瞬时和随机的，大部分还是有一定的规律可循或是可以预见的。SG 的智能调控也还离不开人的操作，例如与邻近或邻国电网之间的购销交易。完成软硬件两方面的建设是一个与能源低碳转型齐头并进的历史进程，需要几十年的时间。

前文中的小故事反映出计划经济的电价机制连天然气 CHP/CCHP 这样的先进生产力都不能适应，更不可能适应未来大量光伏、风电占据发电主力的局面。目前在高额补贴机制下仍有大量“弃风”、“弃光”和“骗补”现象，就是例证。中央全会决议指出“市场能够有效地配置资源”已为世界百多年和我国40年来生产力的发展所证实。德国2014年6月9日短时光伏发电负荷26 GW超过了全国的用电负荷的一半，2015年3月日全食的一个多小时经历了光伏发电从0到100%的大幅度波动。通过预先和实时的市场化的行为，供电方和购电方自己就解决了问题，并没有采取任何强制调度的措施。截止2015年，德国已有约三万架风机和150多万个太阳能系统在运行，可再生能源装机已经达到了35 GW，发电量占比从2000年的6%提升到了44%。如图4所示，可再生能源电站从2000年的3万个增加到了去年的160万个，显示了德国新能源发展



注：红色代表风电；黄色代表光伏；绿色代表生物质。

图4 2000—2014年德国可再生能源发电增长示意图  
Fig. 4 Renewable power increase of Germany, 2010—2014

的步伐<sup>[9]</sup>。

德国2008年开始的E-Energy计划是德国绿色IT先锋行动计划的组成部分，计划包括智能发电、智能电网、智能消费和智能储能四个方面。包括6个试点的E-Energy计划是为了分别开发和测试智能电网不同的核心要素，试图在“面向耗电的发电”基础上加上“面向发电的耗电”。即变按需生产为实现按照生产情况进行消费。实质上是将可转移负荷转移到非峰值时间<sup>[10]</sup>。显然，交易价格是促成负荷转移的有效驱动力，其作用和效率超过储能。笔者2011年曾参观过德国曼海姆地区的一个能源互联网示范项目；其中包括在一个退休工人的住宅里安设了智能供电仪表，能够在低谷电价时段自动启动家中的主要耗电设施——地源热泵和大洗衣机。可节省15%电费。

德国输电网的主要电压等级是220~380 kV，配电网的电压等级从110 kV，20~10 kV到400 kV。电力市场化之后德国有4家输电网公司和900多家配电网公司。德国近十年来可再生能源发电快速增长的经验表明，配电网的智能化改造是智能电网SG建设的重点，可以较少的投资解决大量光伏和风电上网带来的电压增高、超负荷、潮流反向等问题，是实现双向市场化交易的硬件基础。至于长距离的输电网，德国急需把北方富余风电输往南方工业区替代原有火电的220~380 kV输电线路建设，却由于征地极其困难而迟迟不能启动。所以非常羡慕中国电网已达到的规模<sup>[11-13]</sup>。

而在中国，实现上述大小两种DES与SG之间可以双向互动要求首先应改造现有只适应于单向流动的枝状配电网，建成千万个具有环状回路的智

能微电网,才能给 DES/CCHP 提供 16 h/d 运行的条件,也才能使大量分散的光伏和风电有效上网。长达数千公里的特高压输电电网只有在单位输电费用与两地光伏或风电成本之差存在较大差值的条件下才有经济性<sup>[13]</sup>。可是科技快速发展的方向却是使这个差值越来越小、甚至逆转。用不了十几年,在特高压光伏输电成本不低于 0.2 元/(kWh · 10<sup>6</sup> m)条件下,即使免费的光伏输送到 2 000 多公里负荷中心也不如就地分散的光伏发电经济了。这是制订能源战略时需要深思的。

## 5 结论

本文展望了可再生能源为主的互联网+智慧能源时代能源系统的新架构和电力供需时变性的新挑战,研究结论如下:

1) 气候变化、能源低碳转型将使半数以上电力由分布式供能系统就地转换直供用户,不再通过大电网集输和交易。集中、单向、垂直的“能源供应系统”将转为分散、双向、扁平的智慧能源网络(IEN)即能源互联网。其核心骨架智能电网(SG)将主要作为各种电力集散、交易的平台,和智能调配、控制以实现实时供需平衡的中枢。

2) 可再生能源的分散性、冷热电蒸汽用户的分散性和提高能效的需要,未来大、小两类 DES/CCHP 将覆盖绝大多数工业和建筑物终端用能户,构成能源互联网的联结对象和基础单元。其一次能源,大型工业园区和社区 DES 以天然气、光热、四代小型核电为主,小型的以带储能(电)的光伏为主。

3) 未来电力供需时变性呈现新的格局。除了常规的抽水蓄能、非径流水电站等高端储能和快速启停的气电机组之外,16 h/d 运行的 DES/CCHP 和带储电的光伏 DES 将分别成为昼夜调峰和随机调峰的主力;与邻近 SG 的分时段互换交易也是重要手段。

4) 电力交易的市场化改革,与 DES 同步的微电网建设和配电网改造,以及建立在互联网、大数据、云计算和人工智能的基础上 SG 和 IEN 系统的建设,是可再生能源时代实现电力供需平衡的决定因素。德国的实践值得借鉴。

### 参考文献:

[1] 华贲. 中国分布式冷热电联供能源系统发展机制创新的历史

机遇[J]. 中国电力: 技术版, 2010(2): 37-40.

HUA B. The historical opportunity of developing mechanism of DES/CCHP in China [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2010(2): 37-40.

[2] 华贲. 区域分布式能源与智能电网安保调峰的战略协同[J]. 中国电力: 技术版, 2011(3): 1-6.

HUA B. Strategic synergy of DES and smart grid supply ensuring and peak shaving [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2011(3): 1-6.

[3] 华贲. 从战略高度审视中国天然气发电, CHP 和 CCHP [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 1-8.

HUA B. Regarding natural gas power, CHP & CCHP at the strategic height [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(2): 1-8.

[4] 华贲, 天然气发电与分布式供能系统[J]. 中国电力: 技术版, 2011(10): 1-6.

HUA B. Natural gas power generation vs distributed energy supply system [J]. China Electric Power (Technology Edition), 2011(10): 1-6.

[5] 华贲, 尽快改革天然气各类用户价格和发电上网价格机制[J]. 天然气工业, 2012, 32(2): 106-110.

HUA B. To accelerate the reform on the classified gas pricing system for different types of downstream gas users and the pricing system for DES/CCHP projects based on electricity grids and peak demand response [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 106-110.

[6] 华贲. 分布式供能是中国“十二五”能源战略重点[J]. 沈阳工程学院学报: 自然科学版, 2012, 8(4): 289-293.

HUA B. Distributed energy system is a focal point of the twelfth five-year energy strategy in China [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2012, 8(4): 289-293.

[7] HUA B. Cogitating about the hiberarchy of energy interne [J]. CSEE Journal: Energy and Power Systems, Accepted in 2016.

[8] 政乾方. 丹麦何以实现高比例风电运行[OL]. 能源观察网 [2015-02-25]. <http://www.chinaero.com.cn/zxd/djxx/ycwz/2015/03/147503.shtml>.

[9] 佚名. 令人惊叹的德国能源转型(能源列国志之一) [N/OL]. 财经十一人 [2015-10-13]. <http://chuansong.me/n/1806206>.

[10] 每周能源信息专报编辑部. 德国美国关于能源互联网的探索和实践 [N]. 每周能源信息专报, 2015-06-20(2).

[11] 陈恒思. 德国智能电网发展启示 [N]. 南方能源观察, 2014-06-28(1).

[12] 王彩霞, 李琼慧. 德国光伏发展启示 [N]. 中国电力报, 2015-03-28(2).

[13] 何勇键. 电从远方来, 还是电从身边取? [N/OL]. 新浪财经“能见派”, 2016-01-21(1).

(责任编辑 郑文棠)