智能电网和能源互联网

(Smart Grid, energy Internet)

余贻鑫

yixinyu@tju.edu.cn 天津大学

2016.5.6





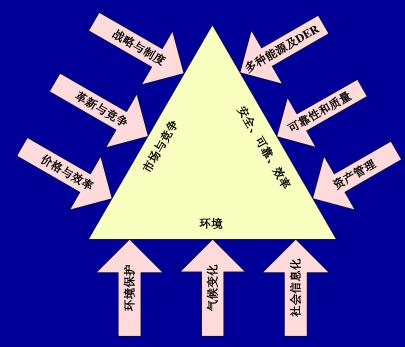


I. 智能电网介绍

I. 1智能电网原动力

智能电网是电网和现代通信信息技术融合于一体的新型电网 ,其实施

- 不仅能使用户获得高安全性、高可靠性、高质量、高效率和价格合理的电力供应,
- 还能提高国家的能源安全, 改善环境,推动可持续发展
- 同时能够激励市场和不断创新,从而提高国家的国际经济竞争力。

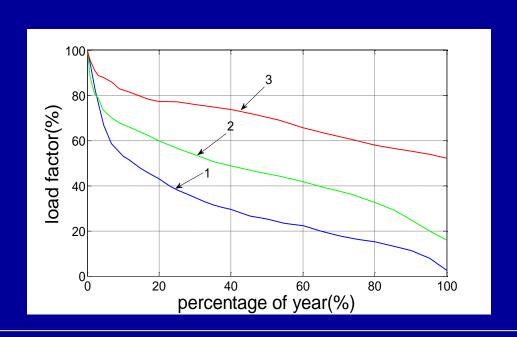


通过能源革命解决大气污染和温室气体排放。碳排放中, 电和交通运输是两个最大的部门,在 美国分别为24%和15%。所以为了实现巴黎协议,电的低碳化是绝对需要 的。

电网视角的4个原动力

- ① 提高电网的安全性(含稳定性)、可靠性和韧性;
- ② 分布式电源(DER)的大量接入和充分利用;
- ③ 峰荷问题和需求侧管理,提高资产利用率和效率;
- ④ 对电网各种约束(提高可靠性、提高电能质量、 节能降损和环保)日益严格。

峰荷问题和需求侧管理,提高资产利用率和效率



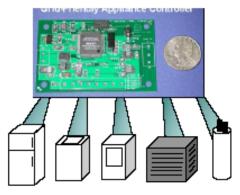
我国中压配电资产利 用率比美国还低下

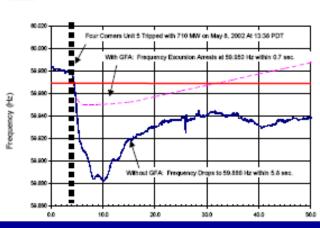
调查表明2008年我国:

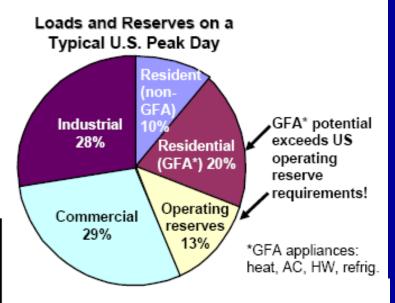
- 29个城市10kV线路全年平均利用率在10 30%之间的占72.5%;
- 39个城市配变全年平均利用率在10-30%之间的占97.5%。(美国为43%)
- ✓ 由于安全性的限制,最大负荷(即峰荷)时刻,36个城市10kV线路平均负载率在50%以下,其中有22个在40%以下;
- ✓ 38个城市配变峰荷时刻平均负载率在50%以下,其中有31个在40%以下。

系统中存在着大量能与电网友好合作的可平移负荷









Grid-Friendly Appliances sense grid frequency excursions & control region's appliances to act as spinning reserve – No communications required!

可平移的负荷如通过感知电网的频率漂移,而自动投切,则可担负起调频的任务,起到旋转储备的作用一此事无通信要求。

对电网的各种约束日益严格(可靠性、电能质量、节能降损和环保)

数字经济(所占比重迅速增加)对可靠性和电能质量提出了很高的要求!美国EPRI对未来 20-30 年对电网可靠性的预测如下表:

可靠性	比例
Reliability of 9 nine	0.6 % 增加到10%;
Reliability of 6 nine	8- 10 %增加到60 %

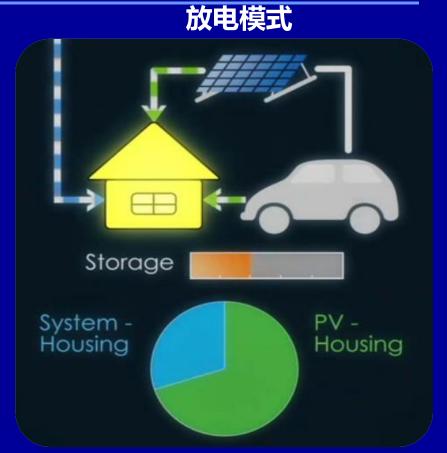
由独立的双电源供电节 点的可靠性

$$LOLP = 1 - (1 - LOLP_1)(1 - LOLP_2)$$

若 $LOLP_1 = LOLP_2 = 0.9999$
则 $LOLP = 0.99999999$

Killer application,效益与挑战并存





电动汽车不再仅仅是一个耗能机器。它同时也成为电网中蓄能装置。 通过电动汽车蓄电池,在用电低谷(电价便宜)时充电,并在白天最 需要(电价贵)的时候将它输回电网。

I. 2 智能电网的特点与组成

智能电网的特点是电力和信息的双向流动性,以便建立一个高度自动化的和广泛分布的能量交换网络。为了实时地交换信息和达到设备层次上近乎瞬时的供需平衡,把分布式计算、通信和互联网的优势引入电网。

智能电网(SG):电网的第二次智能化











Smart Generation

Smart Transmission

Smart Substation

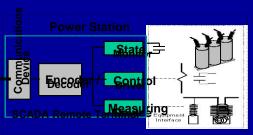
Smart Distribution

AMI

Smart Consumer

From Felix Wu









电网的第二次智能化,是在完善输电智能化的同时,把输电网的运行模式和能量控制手段(如EMS)推广到配、用电层。从用户侧的智能电表和AMI开始,通信和控制用的ICT基础设施覆盖全网。

智能电网 (Smart Grid) 的总体设想

智能电网将像互联网那样改变人们的生活和工作方式,并激励类似的变革。但由于其本身的复杂性且涉及广泛的利益相关者,智能电网的实现需要漫长的过渡、持续的研发和多种技术的长期共存。

短期内,我们可以着眼于实现一个较为智能的电网(smarter grid)。它利用已有的或不久的将来就可配置的技术,使目前的电网更有效;在提供优质电力的同时,也创造相当大的社会效益

智能电网和目前电网功能的比较

特征	目前	将来
(一)激励/包括 电力用户	电价不透明,缺少实时定价,选择很少	提供充分的电价信息,实时定价,有许多方案和电价可供选
□提供发电/ 储能	中央发电占优, 少量DG, DR, 储 能或可再生能源	有大量"即插即用"的分布式 电源补助中央发电(节能、环 保)
(三)开发新的 产品、服 务和市场	有限的趸售市场,未很好的集成	建立成熟、健壮、集成的电力市场。能够:确保供电可靠性、为市场参与者带来利益、为供应商创造市场机会、为消费者提供用电管理的灵活工具。

特征	目前	将来
卿满足电能 质量需要	关注停运,不关心 电能质量	电能质量需保证,有各种各样的质量/价格方案可供选择
(五)优化	很少计及资产管理	电网的智能化同资产 管理软件深度集成
(:)自愈	扰动发生时保护资产(保护跳闸)	防止断电,减少影响
(七)抵御攻击	对恐怖袭击和自然 灾害脆弱	具有快速恢复能力

智能电网的主要组成

integrated Enterprise-Wide Consumer Energy Management Systems **Advanced Control Systems** Future Apps and e.g. - Bid/Ask Market Data necessary for e.g. - Real time energy markets Services buying/selling power ntegration of advanced and legacy systems into business processes Home/Building Web-based "portals": online bill pay/ mepay, historical energy data, comparison of energy use piers/neighbors. TOU pricing into, cartien footprint dat **Business** and Application data flow to/from end-user Energy Management Systems Customer Care Utility Control and Load Smart Charging of Application data flow for PHEVs End-User Interface for PHEV Smart Charging and V26 PHEVs and V2G Distributed Visibility and control Simple integration of distributed generation Generation and systems for distributed Monitoring and discharge of distributed assets assets Storage Self-healing grid: Fault prediction, outage management, remote switching, minimal congestion, dynamic control of voltage, weather data integration, centralized Distribution and Substation automation, asset protection, advanced sensing, PQ management, automated feeder reconfiguration EMS/DMS, DMS, GIS **Grid Optimization** Point of consumption voltage readings capacitor bank control Advanced demand maintenance and demand response; Precise and adaptable control (granular data **Demand Response** Load forecasting and shifting and visualization of appliance energy use) Remote meter reading, remote disconnect/connect, tamper and theft Real-time customer access to meter data; AMI, MDM, CIS, outage meter sends "last gasp" signal in advance of detection, short internal readings, customer prepay, mobile workforce AMI detection, billing management **Network Gateway** Smart Meter FAN/AMI WAN HAN LAN ntegrated Cyber Security Backhaul network between FAN and Missing link in end-to-end network; Network linking loads and appliances for Enterprise network the Utility now being deployed at scale utility and consumer control and mgmt Communications BPL/PLC Layer 툺 롮 Routers, towers, repeaters, wired backhaul Relays, modems, bridges, access points, Grid aware devices/networks: access points, smart thermostats & appliances, energy portals, routers home network infrastructure Security: Asset Monitoring Distributed Generation and Storage Substation Distribution Home/Building Generation Transmission Power Layer and Protection Centralized Generation: 138-750 kV Automatic correction: **Phaser Measurement** Introduction of 2-way power Smart Meters: Coal, Natural Gas. Units (PMUs)/Optical flow: Solar PV, Micro Wind Super Conducting Voltage, Frequency and Automation of Home/ Power Factor Issues. Turbines, Fuel Cells, Nuclear, and Increasing cables reduce line loss, Sensors; Dynamic Sag **Building Systems**; next Renewables (CSP, Bulk carry 3-5 times power Integrated Volt/Var; Reduction; IED Distributed Storage and generation appliances Wind) (HVDC, FACTs) **Dynamic Thermal Ratings** Integration PHEVs: DC Microgrids Utility Infrastructure Consumer

Source: GTM Research

I.3 智能电网的直接经济效益

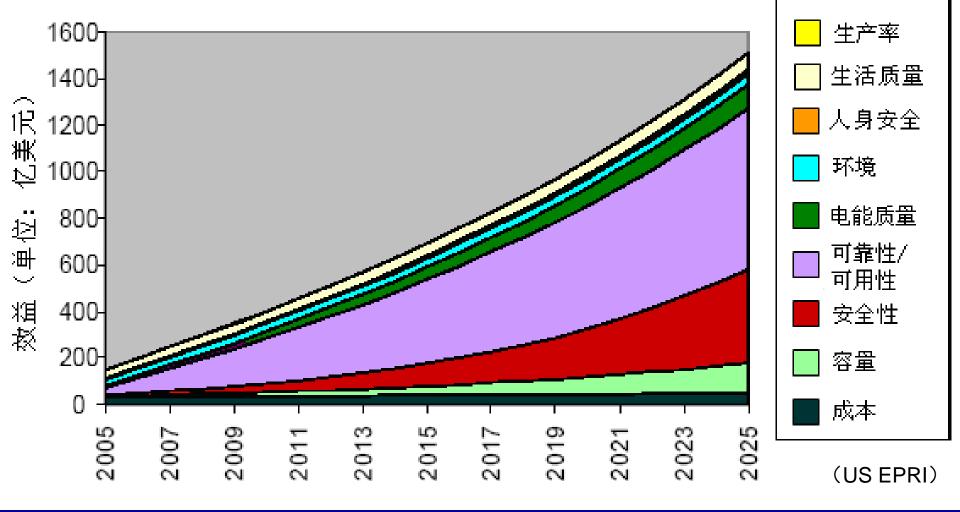
美国EPRI2004年所做的初步估计:

未来20年,在美国实现智能电网成本所做的初步估算(以2002年美元的价值计)是:总投资为6255亿美元;未来(智能)输配电网需附加投资(贴现值)为1650亿美元(其中输电380亿美元,配电和用户参与1270亿美元)。效益为6380到8020亿美元,效益与投资比为4.1-5.1

2011.04.07news:

美国电科院基于"在2030年前持续稳定地开发智能电网技术"的假设,提供的一份新报告中说,在美国实现"完全功能的智能电网"的花费会在3380亿到4760亿美元之间。但是使人惊讶的是,其效益(ROI)会处于13000亿美元和20000亿美元之间。

各种属性效益



智能电网的效益可以归结为:电能的可靠性和电能质量提高方面的收益;电力设备、人身和网络安全方面的收益;能源效率收益;环境保护和可持续发展的收益以及直接经济效益。智能电网的所有相关人群均可受益。

I.4. 智能电网是一个推动者(enabler), 智能电网的相关技术将催生新的技术和商业模式,实现产业革命

- 能够激励/包括电力用户:向用户提供充分的实时 (或分时)电价信息,有许多方案和电价可供用户 选择;
- 能够容易和透明地接受任何种类的能源;
- 以大量"即插即用"的分布式电源补充集中式发电, 从而创造新的机遇和市场;
- 末端用户可以积极参与成熟、健壮、很好集成的趸售市场;
- 提高电能质量,有各种各样的质量/价格方案可供选择;
- 优化资产利用和高效运行;
- 自愈:发生故障时系统可自愈,减少停电影响;
- 抵御攻击:遇到恐怖攻击或自然灾害时具有快速恢复供电的能力;等。

智能电网的相关技术可以分为如下3类:

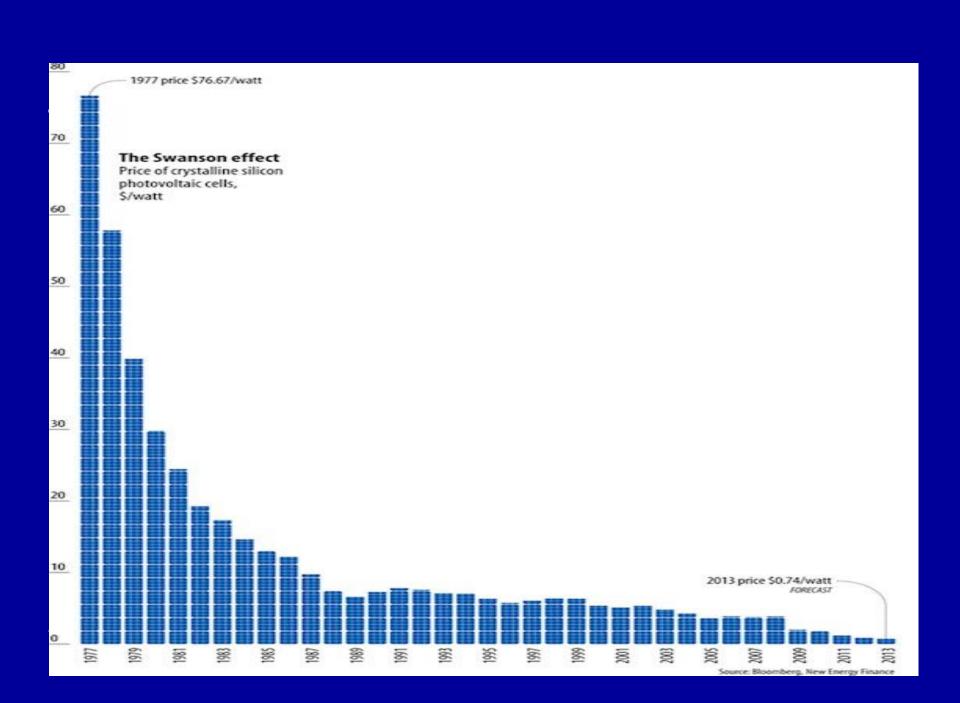
- 1)智能电网技术,包括广域监视(WAMS/PMU系统和态势感知)与控制、信息和通信技术(ICT)的集成、可再生和分布式发电的集成、输电的扩展应用(如灵活交直流输电技术)、灵活的配电网络拓扑和高级配电网管理、高级量测基础设施、电动车辆充电基础设施和用户侧系统。
- 2)智能电网可带动的技术,包括风力发电机组、光伏发电装置、插件式电动汽车、绿色节能建筑和智能家电等,其中电动汽车和绿色建筑可能成为智能电网最具冲击性的应用。
- 3)为智能电网创建平台的技术,包括综合的通信技术、 传感和测量技术、储能技术、电力电子技术、诊断技术 和应用超导技术等。

II. 广泛的分布式电源

储 分布式 需求 能 发电 侧管理

- 电力用户和电动汽车是分布式的
- 大量的分布式发电

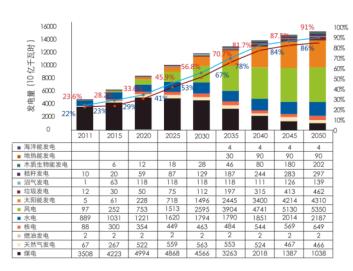
鉴于分布式电源靠近电力负荷,功率与能量可以就地消纳,所以它可以节省电网的投资、降低网损和运维成本。再加之传统电价逐年上升,而太阳能光伏成本迅速下降,储能价格也在不断下降,进而以燃气为主的分布式冷热电联产(CHP)系统的能源利用率已>80%,这一切预示着分布式电源的单位电能成本与电网平价的时机已在视野之中。而且分布式电源可以提高对用户供电的可靠性、增强电网的安全性和韧性。所以世界上智能电网的研究、开发和实施主要是关于分布式的。



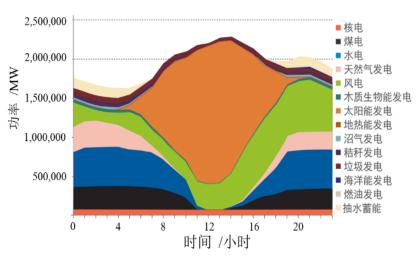
能源革命的实现高度依赖未来高比例可再生能源的 开发与利用---倒逼和可行

可再生能源发电的长期目标

习近平主席于2015年的巴黎大会上承诺,2030年中国单位GDP二氧化碳排放比2005年下降60%~65%。



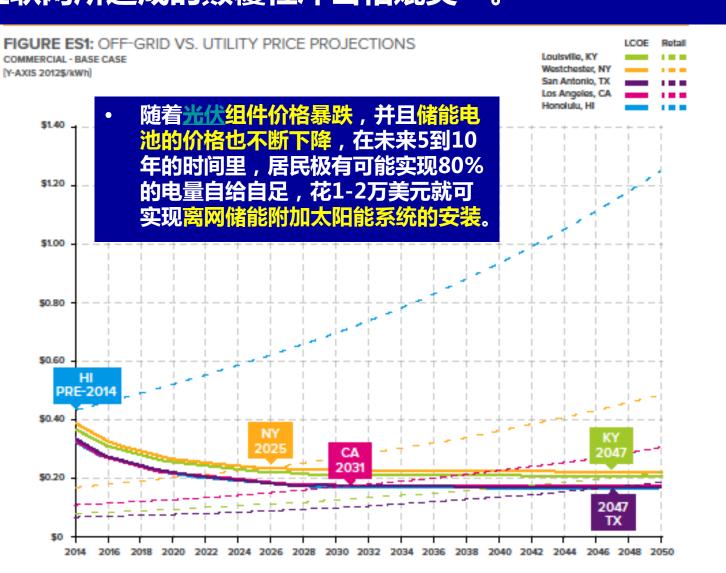
各类电量的构成



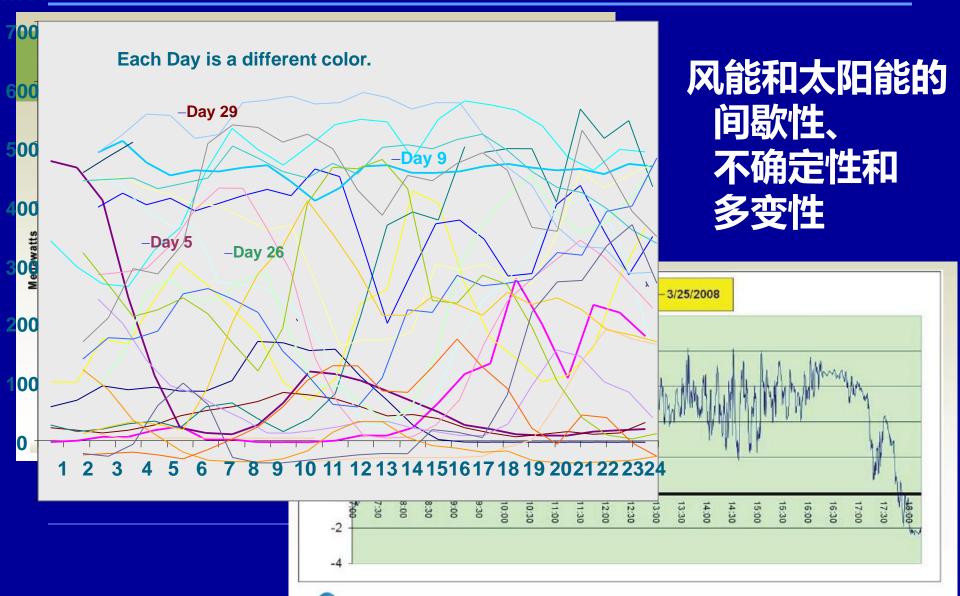
典型日机组组合调度分析

2050年的发电情况:可再生能源发电比重将达到85%以上;非化石能源发电比重达到91%;风电和光电之和占总电量的比例达到63%;火电将急剧减少。

 美国前能源部部长朱棣文(Steven Chu)2014年3月初表示,储 能技术与太阳能技术相结合, "在配电和发电领域的影响或可与 当年互联网所造成的颠覆性冲击相媲美"。







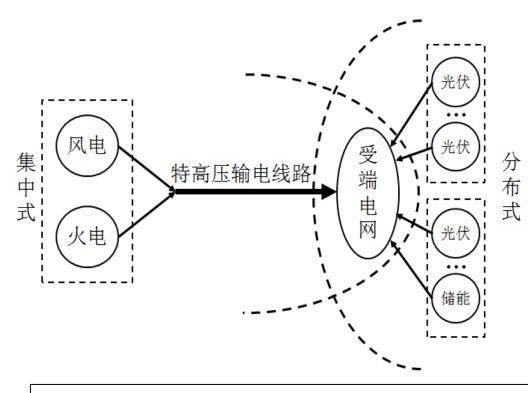
- 风能和太阳能的间歇性、多变性和 不确定性 + 储能价格贵
- 电动汽车充电和需求响应的不确定 性



挑战性问题如何平滑?如何调度?



两种模式的定义

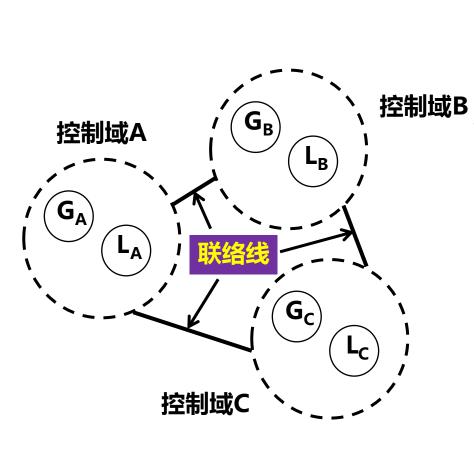


- 集中式: 在西部地区大规模开发 风电和光伏基地,然后通过特高 压直流(UHVDC)线路远距离输 送到东部负荷中心,即基地式开 发、集中式建设、远距离输送的 模式可称为"集中式+远距离输送"模式,简记为"集中式";
- 分布式:与集中式相对,在中东部负荷中心开发、容量比较小、分散地接入当地配电系统、就地消纳的模式,可称为"分布式"。

假设1:特高压直流工程最适合长距离外送集中式的可再生能源电能。

注1-p.1

预备知识--互联电力系统 "控制区(互联区)"与互联标准^[*]



- 20世纪20-50年代,电力行业杰出的工程师们提出了联合电力系统理论,该准则已经在电力行业实践了近百年(对应统一电力系统);
- 互联电力系统理论提出了"<mark>控制区</mark>" 的概念,并为"控制区"制定了运 行准则:
 - ✓每个控制区均需要维持其与其他 系统联络线上的功率交换计划; 即使在该区域内有大量干扰时, 也需达到此标准。
 - ✓ 控制区内部发电的调节需要随时 吸收其内部负荷的变化,即使发 生大的变化也要自行解决。

控制区如何运作以完成目标是其自己 的事。

注1-p.2

- 互联电力系统理论提出了"控制区"的概念,它可能是历史上原本独立的电力系统,也可能是按地理边界、行政边界或市场而划分的。
- 各控制区按照如下准则工作:控制区内发电的调节需要随时吸收其内部负荷的变化,即使发生大的扰动也要自行解决;区域电网之间联络线上的功率均按功率交换计划工作,为了电网的安全经济运行,该计划值在一天内会平稳在少数几个水平上。
- 现代术语中,控制区定义了互联网络的接口并概述了内 在运作方式。控制区是互联电力系统的基本单元,并且 必须维持包括交易安排在内,实现瞬时供需功率的平衡

注1-p.3

- 该准则是在电网运行和管理的实践中逐渐总结出来的 ,已为电力系统近百年的实践证明是成功的。其开放 、互联、对等和分享的特点与后来的互联网一致。
- 其核心是认定,在规范约束下可通过局部利益最大化来实现总体利益最大化。
- 这需要通过三步完成:
 - 1)安排和调度发电来维持净功率平衡,
 - 2)利用同步发电机的调速器和二次调频系统进行频率控制来消除不平衡带来的波动,
 - 3)在发电不能满足负荷需求的紧急情况下进行负荷削减。

"集中式+远距离输送"无法实现能源 革命所必须的高比例可再生能源情景

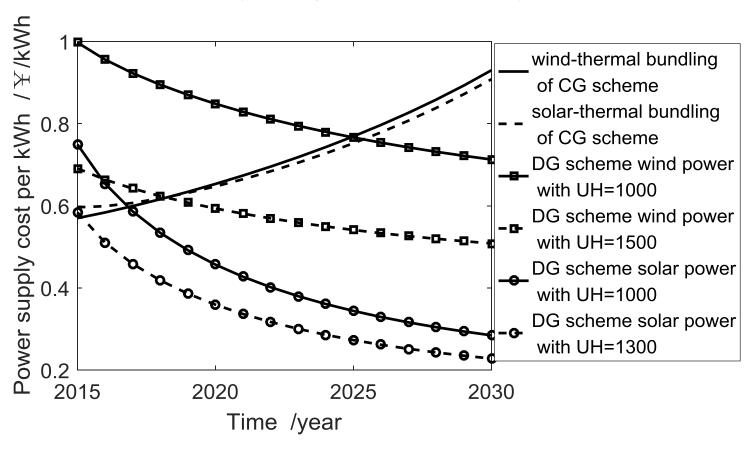
- · 从电量角度, 仅靠集中式不能向受端系统输送远景规划中的风电和光电;
- · 从实时供需平衡角度,集中式的发展将 大大降低受端系统接纳分布式的潜能;
- · 从灵活电源的角度,集中式将导致东部已有火电机组利用率和效率大幅降低,却又在西部地区新建大量的火电厂。

因此,可以得出只有放弃集中式、依靠分布式才能最终实现"能源革命"的结论。

"分布式"的单位电能全社会成本已经或即将低于

"集中式+远距离输送"

社会成本的变化趋势



单位电能供电成本的变化趋势

小结

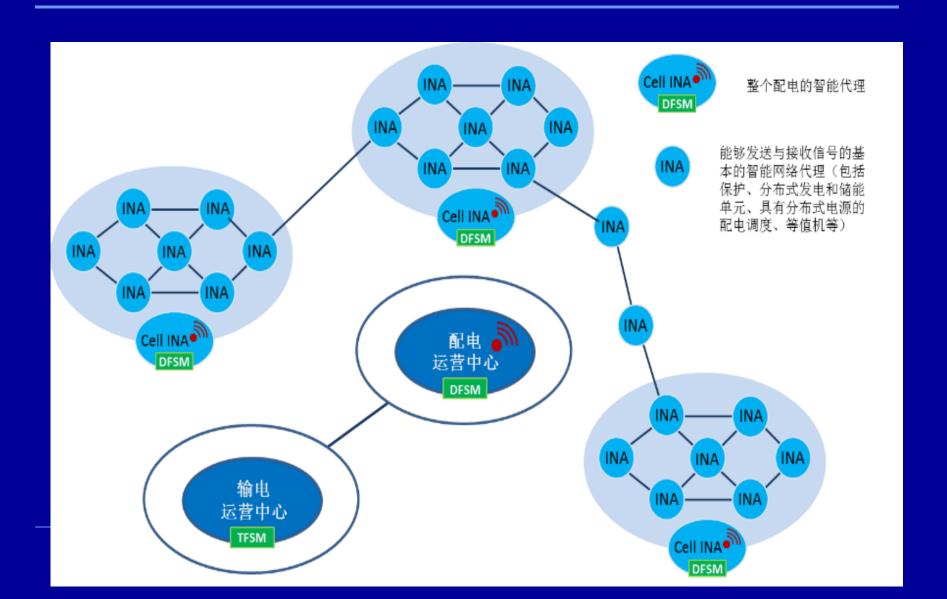
通过互联电力系统的定性分析和全社会价值的定量 比较,表明:

- a) 在发展风能和太阳能发电时,"集中式+远距离输送" 开发模式不仅其本身不能实现高比例可再生能源情景,而且阻塞了在负荷中心高比例分布式光伏发电和风电发展之路;
- b) 从全社会价值角度看,"分布式"模式(特别是光伏发电)的单位电能成本已经或即将低于"集中式+远距离输送"模式;

我国开发风能与太阳能发电时不可舍近求远

III. 智能电网(能源互联网) 是分布式智能的基础设施

智能配电网是分布式智能的基础设施



- 如图所示,以智能配电网为例,它被分成许多片(Cell)。
- 每片中有许多由片内通信连接起来的智能代理INAs(如继电保护、DER等),这些代理能够收集和交流系统信息,可以对局部控制做出自主决策(如继电保护),也可以通过片中的配电快速仿真与建模(DFSM)协调做出决策(如电压调节、无功优化、网络重构等);
- 同时各片之间有通信联系,可以各片自主做出决策,也可由装有DFSM系统的配电运营中心协调各片的决策;
- 进而(控制区的)输电调度中心和由该控制区供电的配电运营中心之间也有通信链接,装有输电快速仿真与建模(TFSM)控制区的输电调度中心,根据区域电力系统(控制区)的要求协调决策,增强整个区域系统自愈(self healing)能力和韧性(resilience),并实现经济运行。

它可以解决如下问题

- 微处理器岁月之前创建的集中规划和控制的电力基础设施,在很大程度上限制了电网的灵活性,失去了效率,致使在可靠性、安全性和韧性等几个关键方面承担着风险;
- 适应海量的DERs及其难以观测和难以预测的问题, 尽可能地实现就地平衡^[注1];
- 提高电网的自愈能力和韧性[注2]。

0

由于未来电网中将接入数量巨大的分布式电源,并且是间歇的、多变的和不确定的。为了解决大量分布式电源的预测、监视和控制难的问题,也最好分区分片就地解决,所以把区域电网互联的模式下移:

- > 区域互联的运行方式
- > 包括EMS在内的许多技术

下移的深度可达各种规模的配电网乃至绿色建筑,被称为微电网。由于具有"互联、开放、对等、分享"性质方面十分彻底,是当然的能源互联网。

如此看智能微电网是能源互联网的典型的自治单元。

【注2】 "韧性(resillance)" ,这是电网当前国际最关心的, 也是设想中智能电网的主要功能。

此处"韧性"这个词,在美国总统政策方向21 (Presidential Policy Direction 21,简记为PPD 21)中 被定义为"准备和用来改变、承受(禁得住)和快速恢复破 坏所造成条件的能力"。"韧性包括承受(禁得住)和从蓄 意的攻击、偶然事故或自然发生的威胁或变数中恢复的能 力。"

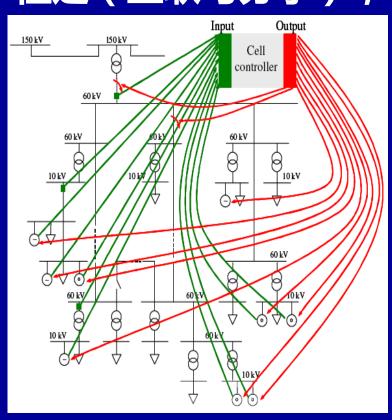
智能微电网(Smart Micro-Grids)与大电网无缝连接也是建立在 这一理念之上的。

智能微电网(Smart Micro-Grids)与大电网的无缝链接是perfect

- 满足互操作性标准,即插即用(互联、开放)
- 正常时,保持系统联络线功率恒定(互联与分享),
 - 内部调度自行决定(对等);
- 事故时孤网运行(对等);
- 事故后黑启动(互联)

在未来的智能电网中它会广泛存在,

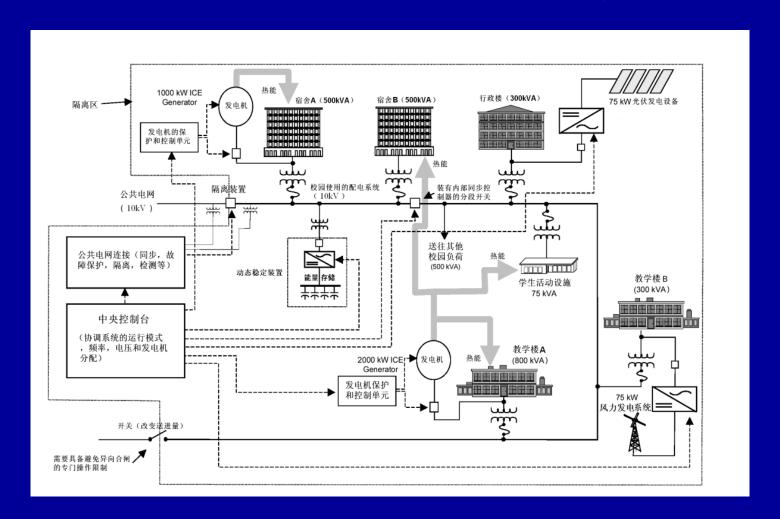
应更多的重视降低其 成本的相关研究。



绿色箭头代表测量,红色箭头代表cell控制器的控制行为

丹麦Cell控制试点工程

正常运行时,可再生能源的间歇性、波动性和不确定性可在微网内部得到补偿(平滑),从而可维持它与大电网连络线上的功率近乎恒定,有助大电网安全经济运行。因而对大电网而言它是个"好市民"。



未来智能配电网(或称之为主动配电网)的结构与控制策略必须能支持现在结构所不能支持的两个基本要求:

- 终端用户控制和总体配电系统控制综合考虑。终端用户系统除拥有可与电网友好合作的可平移负荷之外,还有分布式电源,电力调节设备,无功补偿设备和能量管理系统。所有这些设备和负荷的控制必须和配电系统控制综合考虑,以达到系统性能的最优和期望的安全性与质量;—显然它未要求终端用户是智能的和自治的"好市民",把下层的(终端用户的)责任担起来了;同时它对输电网也不是个"好市民",输电网把下层配电网的部分责任担起来了。
- 支持高比重的或不同比重的分布式电源,以提高系统的整体性、效率和灵活性。

一片智能配电网(或主动配电网),没有自治能力,需要由输电网向其分配电力(随时补充其需求缺额)

智能电网是个典型的物联网。因为其技术涉猎十分广泛,特别是分布式的可再生能源和储能装置以及智能电网把注意力放在局部控制和减少对外部的依赖,对电网来说这是"颠覆性的"变化。

这一点已经一再倍强调,在麦肯锡:影响未来(到2025)的颠覆性技术报告中的12项中与智能电网相关的至少包括3项(物联网、储能技术和可再生能源)

"智能电网将把工业产业界最好的技术和理念应用于电网,以加速智能电网的实现,如开放式的体系结构、互联网协议、即插即用、共同的技术标准、非专用化和互操作性等。"

"事实上,有些技术已经在电网中得到应用。但是,只有在辅以体现智能电网的双向通信和即插即用能力的时候,其潜能才会充分体现出来。"

互联网思维贯穿其概念的形成和发展的全过程

译自: U.S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. The smart grid: an introduction[R/OL]. [2009- 11-03]. http://www.oe.energy.gov/1165.htm.

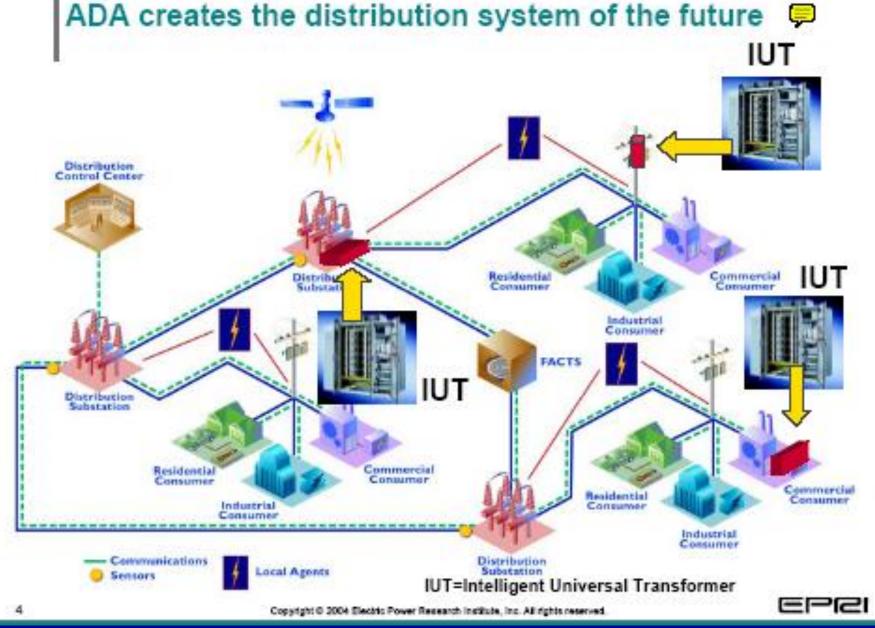
IV. 能源互联网与智能电网特征比较

Lifjin的

第三次工业革命(能源互联网)的构想

Lifjin(里夫金)宣称,人类社会必将迈进一个新时 代,届时可再生能源和互联网技术将融合以创造一 <u>套强大的新基础设施,即他所谓的第三次工业革命</u> 。在这一愿景中,数以亿计的人们会从他们家中、 办公室和工厂的可再生能源中生产绿色能源,并在 "能源互联网"中它们彼此分享,就像现在我们在 线创造和分享信息。通过部署各种储能技术,能量 将本地存储在每一栋建筑和整个基础设施中。而且 ,交通车辆将转变成电动和燃料电池汽车。 (J. Rifkin, The Third Revolution, Palgrave Macmillan: New York, 2011.)

- ① 互联:实现相互支援;
- ② 对等:能量自治单元之间的对等互联。"第三次工业革命带来的能源互联网中可再生能源的分布式特性需要的是协作而不是集中或分级的命令和控制机制。"
- ③ 分布(分享):以分散式的局部最优(就地局部补偿DER的波动和维持个体净功率平衡)实现全局能量管理的优化调度。
- ④ 开放:基于互操作性标准,即插即用。



小结

- ① 智能电网与能源互联网基本理念是一致
 - ●能源互联网和智能电网都强调电网需适应大量的各种形式的分布式电源;
 - 能源互联网强调需具有互联网的互联、开放、 对等和分享特性,而智能电网也是
 - > 互联的和分布智能的基础设施,
 - ➢ 强调具有自治(对等)和分享(分担)能力的微电网是完美的。
 - ➢ 强调互操作性和即插即用(互联、开放),
 - > 提出了IUT(能源路由器)

智能电网的这些思想可以追朔到区域互联电网

②鉴于Smart Grid并无上界,而且里夫金的能源互联网就是指的电网所以,里夫金的能源互联网=Smart Grid。

③能源互联网的可以扩展到多能量系统(智能能源网),此时智能电网将会成为能源互联网的核心。

V. 关注多能量系统的 能源互联网

能源互联网的可以扩展到多能量系统,此类能源互联网特别值得注意。只是电这种能源形式的优越性决定了,未来智能电网仍会是能源互联网的核心。

智能能源网概念



智能能源网是以智能电网、 智能燃气网、智能水网、 能热力网、废弃物资源智能 利用、污染源智能调配、智 能排放控制等多行业间的能 源资源输配架构为基础 , 以 供能多源稳定、用能清洁高 效、输能快捷方便、蓄能安 全充足、排放减量达标为特 征,以信息通讯技术和智能 数据中心为依托的,多元互 动、资源整合、优化配置的 能源网络。

智能能源网络发展——高效梯级利用技术路线



谢谢!

主要文献

1. 智能电网的基本理念阐释

Yixin YU, Yanli LIU, Chao QIN, Basic Ideas of the Smart Grid(J), Engineering, 2015,1(4):405-408.

2. 未来具有智能外围的智能电网:能源互联网的架构

Felix F. Wu, Pravin P. Varaiya, Ron S. Y. HuiSmart Grid with Intelligent Periphery for the Future: Architecture for the Energy Internet (J), Engineering, 2015,1(4)

3. *N. Cohn, Control of Generation and Power Flow on Interconnected Systems, John Wiley and Sons: New York, 1961