

智能电网实施的紧迫性和长期性

余贻鑫

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 树立智能电网实施的紧迫性和长期性的观念对智能电网持续健康地发展至关重要。首先在已有著述的基础上, 简述了智能电网的本质特征、主要功能及其智能分布式体系结构等基本理念。在此基础上, 指出了目前我国智能电网实施中存在的一些问题, 表明了认识智能电网实施紧迫性的意义。进而论述了具有智能分布式体系结构的智能电网在提升电网韧性与和抵御赛博攻击方面的能力, 从而强化了其实施的现实意义。最后, 从能源转型需要接纳高比例分布式可再生能源发电的角度和智能电网的复杂性的角度, 阐述了智能电网实施的长期性。

关键词: 智能电网的本质特征和功能; 分布式智能的体系结构; 高比例分布式可再生能源发电; 韧性; 赛博安全; 能源转型

Urgency and long-term nature of smart grid implementation

YU Yixin

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Clarifying the basic concept of smart grid is essential for the scientific and effective implementation of smart grids. The urgency and long-term concept of establishing a smart grid is critical to the continued healthy development of smart grids. Firstly, this paper summarizes the basic characteristics, main functions of the smart grid, and the basic concept of intelligent distributed architecture of smart grid based on our existing writings. On this basis, it points out some problems existing in the implementation of smart grids in China, and shows that it is necessary to further understand the true meaning of the urgency of smart grid implementation. Furthermore, the ability of the smart grid with intelligent distributed architecture to improve the resilience of the grid and resist the cyber attacks is discussed, thus strengthening the realistic significance of its implementation. Finally, from the perspective of the need to accept a high proportion of distributed renewable energy generation and the complexity of smart grids, the long-term nature of smart grid implementation is explained.

Key words: essential characteristics and functions of smart grid; distributed intelligent architecture; high penetration of distributed renewable energy generation; resilience; cyber security; energy transformation

0 引言

厘清智能电网的基本理念对于科学有效地实施智能电网至关重要。目前有两个需要厘清的观念: 其一, 认为我国智能电网已经基本建成了, 以致由中国电工技术学会电力系统控制与保护专业委员会、清华大学电机工程与应用电子技术系、华中科技大学电气与电子工程学院和河北电力大学电气与电子工程学院主办的每年一次已连续 10 届的“中国智能电网学术研讨会”是否还有必要延续下去似乎也成了问题; 其二, 为了防范自然灾害和蓄意攻击, 需要建设一个“韧性较强的电网”, 这个电网与智能电网是怎样的关系? 本文试图阐释对这两个问题

的看法。为此本文第 1 节梳理了一些与此相关的智能电网基本理念^[1], 然后在第 2、3 节结合所提到的两个问题进行讨论, 最后给出了结论。

1 智能电网的本质特征和总体设想^[1]

智能电网最本质的特点是, 电力和信息的双向流动性, 并由此建立起一个高度自动化和广泛分布的能量交换网络; 把分布式计算、云、人工智能、大数据和通信的优势引入电网, 达到信息实时交换和设备层次上近乎瞬时的供需平衡。

智能电网将加强电力交换系统的方方面面, 包括发电、输电、配电和消费等。它将:

1) 提供大范围的态势感知, 有助于缓解电网的

阻塞和瓶颈，缩小乃至防止大停电。

2)为电网运行人员提供更好“颗粒度”的系统可观性，使他们能够优化潮流控制和资产管理，并使电网具有事故后快速恢复的能力，即自愈能力。

3)集成和使用大量分布式发电，特别是清洁的再生能源发电。

4)使电力公司通过双向的可见性，倡导、鼓励和支持消费者参与电力市场和需求响应，支持不断增长的电动汽车的使用。

5)为数字化社会提供质量合格和买得起的电力，并为消费者提供机会，使他们能以前所未有的程度积极参与能源消费选择。

6)解决赛博安全(Cyber-security)^[注]问题。

注：Cyber 在本文中译为“赛博”，如 Cyber Security，译为赛博安全，而未译为“网络安全”。这样在谈论智能电网时，遇到“Cybersecurity of power network”，就可翻译为“电力网络的赛博安全”，而不是“电力网络的网络安全”。我们也不把 cyber 译为“信息”，这是为了防止混淆“Cyber Security”和“Information Security”这两个密切联系又存在区别的概念。

表 1 给出了智能电网和目前电网功能的比较。

表 1 智能电网和目前电网功能的比较^[1-2]

Table 1 Function comparison of smart grid and present power grid^[1-2]

特征	目前电网	智能电网
使用户能够积极参与电网优化运行	用户无信息，不能参与系统的运行优化	消费者拥有信息，并可介入和积极参与系统的运行优化—需求响应和分布式电源
容纳全部发电和储能选择	集中式发电占优，对分布式发电接入电网有许多障碍	有高渗透率的、“即插即用”的分布式可再生能源(发电和储能)
使新产品、新服务和新市场成为可能	有限的趸售市场，未很好的集成—用户只有有限的机会	建立成熟的、很好集成的趸售电力市场，为消费者扩大新的电力市场
为数字经济提供电能质量	关注停运，但对电能质量问题响应很慢	保证电能质量，有各种各样的质量/价格方案可供选择—问题可快速解决
优化资产利用和高效运行	很少把运行数据同资产管理结合起来—竖井式的业务进程	极大地扩展了电网数据的采集—重视防止和最小化对消费者的影响
预测并对系统干扰做出响应(自愈)	为防止设备损毁而做出响应，扰动发生时只关注保护资产	自动检测所存在的问题并做出响应—聚焦于防止和最小化对消费者的影响
袭击和自然灾害发生后迅速恢复运行	对恐怖的恶意行为和自然灾害脆弱	对攻击和自然灾害能复原，具有快速恢复能力

智能电网将应用工业界最好的技术和理念以加速其实现，如开放式的体系结构、互联网协议、即插即用技术、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，但只有在体现智能电网的双向通信能力和即插即用

能力的时候，其潜能才会充分迸发出来。

未来的智能电网，就整体而言，将是分级(输电网、配电网、微网、建筑单元的电网)^[3]分布式智能的基础设施，这使其他具有极强的抗扰能力(鲁棒性)，可以接受高比例的风能和太阳能发电，可以抵御各种内、外部的扰动。

如图 1 所示，以智能配电网这一级为例，它被分成许多片(cell)，其中的每个 cell 可以是一个微网或一片主动配电网。正常运行条件下，两片之间的交换功率可以根据制定好的计划进行调度。每片中有许多由片内通信连接起来的智能网络代理(INAs，如继电保护、分布式发电和储能单元、具有分布式电源的配电调度、等值机等)，这些代理能够收集和交换系统信息，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)^[4]协调做出决策(如电压调节、无功优化、网络重构等)；同时各片之间也有通信联系，可以在各片间协调做出决策，也可由装有 DFSM 系统的配电运营中心协调各片的决策；进而输电运营中心和由该输电网供电的各配电运营中心之间也有通信联系，装有输电快速仿真与建模(TFSM)系统的输电运营中心根据区域电力系统的要求协调决策。不难理解，只有分布式智能的电网才能实现表 1 所示的智能电网的功能。

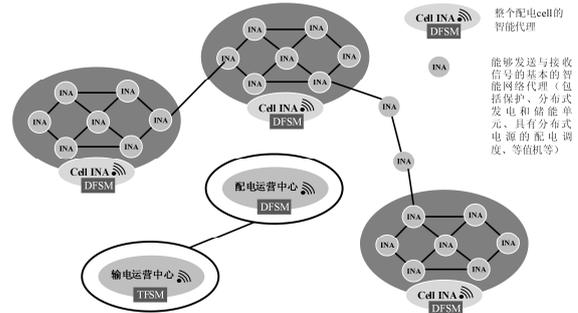


图 1 智能电网是分布式智能(Distributed Intelligence)的基础设施(信息与通信联系)

Fig. 1 Smart grid is the infrastructure of distributed intelligence (information and communication connecting)

2 智能电网实施的紧迫性

智能电网实施的紧迫性，已在文献[1]中作为智能电网的原动力加以论述，此处不再赘述。就我国目前情况看，尽管智能电网的建设得到大力推进，但仍然存在如下明显问题：对分布式电源和智能电网是分布式智能的基础设施重视不够；资产利用率低下且可靠性不高；缺乏完善的市场机制，用户主动参与电网优化运行的程度过低；业务部门之间壁垒较大，协调不够，存在大量信息孤岛；最后一公

里通信不畅通和智能电表信息的应用亟待加强等,致使智能电网功能效益的显示度不够,在这种情况下迫切需要进一步认清智能电网实施迫切性的真正内涵。事实上,智能电网如同互联网一样也是个使能者(enabler),可为新能源技术、通信技术、软件技术、自动化技术、储能技术、(混合)电动汽车,高级传感器技术、电力电子技术、智能电器和智能家居等方面提供巨大商机,会对日常生活、社会和经济发展产生巨大影响。本节以下内容强调指出智能电网在增强电网的韧性和防范赛博攻击方面能力突出。

2.1 智能电网具有在袭击和自然灾害发生后迅速恢复运行的能力

近年来,发生了很多由严重的自然灾害所引发的大型停电事故,包括2008年中国南方冰灾引发的停电,2011年日本地震海啸引发的停电,2012年美国台风桑迪引发的停电等等,这些极端灾害气候所产生的破坏性影响极其巨大。而且近年来地球上异常天气的出现日益频繁。

美国《总统政策21》^[5]中定义韧性为“准备应对并适应不断变化的条件的能力以及承受扰动并快速恢复的能力。包括承受蓄意的攻击、偶然事故或自然发生的威胁或所造成的条件的能力,以及从中恢复的能力”。韧性重点关注系统中的小概率事件,它们往往会造成巨大的停电损失。

采取何种措施可以加强电网的韧性,使电网足以应对这些极端天气和蓄意攻击,以避免产生严重的停电事故,减小停电损失,已成为电网研究工作的当务之急。

一般而言,为了增强韧性需要^[6]做以下两方面工作。

1) 基于脆弱性评估的结果确定网络拓扑和结构的加固方案。其中包括:

(1) 研究并实施节约成本的(基于成本-效益分析的)电网加固规划与设计案;

(2) 构建灵活的网络拓扑和利用分布式能源(微网)保证事故后的持续供电。

2) 加强系统响应能力和事故后快速恢复能力—提高系统的可观测性、可控性和运行灵活性。其中包括:

(1) 增强态势感知能力和更具韧性的通信网络是未来十年提高电网韧性的两个关键领域。有效的态势感知工具可用于支持有效实时的决策,在面对突发事件时保持系统的韧性方面扮演重要的角色。可靠的通信网络是实时有效信息交换的关键。

(2) 同时需要具有自适应能力的广域保护和控制方法、灾害响应和风险管理、快速恢复策略的制

定、分布式控制等支持被损坏系统更快地恢复。

表1已表明具有在袭击和自然灾害发生后迅速恢复运行的能力是智能电网同传统电网之间的重要区别之一。

目前设想中的智能电网主要运行技术包括^[1]高级量测体系(AMI)、高级配电运行(ADO)、高级输电运行(ATO)和高级资产管理(AAM)等四大部分。其中:AMI的主要功能是授权用户,使系统同用户建立起联系,使用户能够支持电网的运行;ADO可以使电网具有自愈和可再生的能力;ATO强调阻塞管理,并降低大规模停运的风险;AAM与AMI、ADO和ATO的集成将大大改进电网的运行和资产使用效率。智能电网的上述4个技术领域均同提高电网的韧性密切相关。ATO和ADO同提高电网的抗扰能力和快速恢复能力相关是很容易理解的,AAM规划灵活的电力网络拓扑和监视资产的健康状况也可以提高电网的抗扰能力。通过AMI的实施将为电网铺设最后一公里双向通信线路,从而建立起一个可实现未来智能电网的遍及系统的通信网络和信息系统体系,将极大地支持电网的可视化,并为泛在电力物联网的实现提供通信和信息基础设施。

需要强调的是:未来的智能电网将是分级(输电网、配电网、微电网、建筑单元的电网)分布式智能的基础设施这一理念极其重要,它使电网能够在扰动发生时做出自愈的响应,在紧急状态下它能分片实现“自适应孤岛运行”,并在其后能够快速恢复全系统的正常运行,从而将停电损失减到最小。

毋庸置疑,提高电网韧性的方法除分布式和智能化(smart)之外,还涉及与硬件设施强化(hardening)相关的措施,甚至需要研发新型材料和设计新型的电力系统元件,不过后者在花费上比较大,故时常需要把smart和hardening两种措施混合使用。因为提高韧性的需要很现实、很紧迫,所以重要负荷地区智能电网(特别是微电网)的建设是一个紧迫的任务。

2.2 赛博安全—智能电网的重要研究领域

图2是美国国家标准研究院NIST^[7]所给出的智能电网的信息交换网络,它是一个复合“框”图,包含7个领域(Domains)。每个领域包含许多应用(作用),它们是通过接口(Interfaces)连接起来的。

智能电网的通信系统将贯穿发电、输电、变电、配电、用户、运行、市场和服务提供商等各个领域,信息控制与电力生产已经形成紧密融合。信息失效可能对电网的安全可靠运行造成严重影响,为此对信息的保密性(Confidentiality)、完整性(Integrity)和可用性(Availability)等关键标准提出了更高要求—近乎“零容忍”。

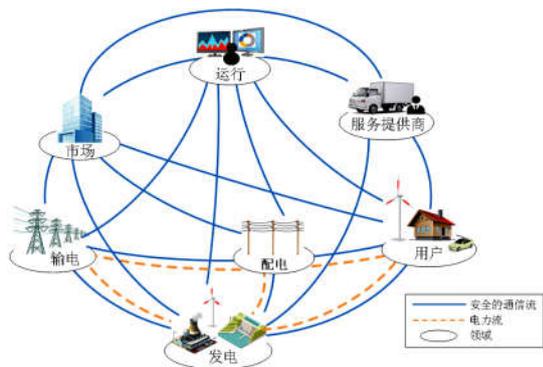


图 2 智能电网概念模型 7 个领域间的通信和互动
Fig. 2 Communication and interaction among 7 domains of smart grid concept model

以“横向隔离、纵向加密”为特征的电力赛博安全体系已被提出，并逐步实施，例如监控电网的 SCADA 系统需要与其他管理信息业务 MIS 或商业应用客户服务系统相隔离。这种通过硬件物理隔离技术将各信息子系统隔离开的做法虽然限制了对关键 ICT(Information Communication Technologies)结构的互访问，但也天然地提供了一种内置的安全性来防范外部威胁。

尽管如此，信息失效显著影响物理系统运行的事故多次发生。特别地，2015 年底在乌克兰，至少有三个区域的电力系统被恶意软件攻击，使得伊万诺—弗兰科夫斯克地区近一半的家庭陷入黑暗，此次停电事件是第一个已知的赛博攻击(注入假数据)^[6]引发大规模停电的实例，使得全球能源生产运行技术人员重新审视并高度关注赛博安全问题。事实上，现实世界上赛博攻击有愈演愈烈的趋势。

与传统互联网信息安全攻击方法相比，由于电力通信信息系统的强防御性，使得针对智能电网的赛博攻击从设计到实施都更具多样性，攻击手段表现出组合不确定性，核心体现在赛博攻击动机变得更为复杂、并发攻击多个潜在的赛博漏洞、赛博攻击途径和方式多样等方面。因此，保障赛博安全以防范各种可能的威胁成为智能电网关键挑战性问题之一。美国 NIST 已把互操作性和赛博安全标准^[8]作为实现智能电网效益以及管理整体成本的关键要素，因为只有支持标准的基础设施才能扩大市场和获得经济效益。

3 智能电网的实施是个漫长的过程

3.1 实现社会可持续发展需要利用高比例可再生的风能和太阳能发电

生态文明和社会可持续发展要求人类社会关注并实施清洁替代和电能替代，以应对气候变化和环

境保护的需要，有效缓解化石能源资源紧缺和能源需求日益增长的矛盾。未来的能源构成将由现在的以化石能源为主、可再生能源为辅转变为以可再生能源为主、化石能源为辅，即未来必然是发展高比例可再生能源发电。在 2050 年建成青山绿水的美丽中国的构想中，可再生能源大约需要占到总能源的 65% 以上，而其中风能和太阳能大约需要占到总能源的 50%。我国现有的风能和太阳能资源^[9]完全可以满足这一高比例可再生能源发电的发展要求—无论是西部地区还是东部地区，而且在我国电力负荷中心所处的中东部拥有足够的风光发电布置空间。但是风力发电和太阳能光伏发电与传统的化石能源发电全然不同，它们是间歇的、多变的和不确定的，不能单独运行，需要采用功率补偿或平滑措施，其中包括：公共电网的吸纳、需求响应、分布式储能和小型燃油燃气发电等。

3.2 应用风能和光伏发电的最好方式是就地开发与消纳

对于可再生能源的应用，是采用在负荷中心地区广泛地发展分布式的风能和太阳能光伏发电系统的“就地开发与消纳”模式，还是采用在远离负荷中心地区建设大规模的风电和光伏基地并将其电能外送到负荷中心的“远距离输送”模式，会直接影响高比例可再生能源愿景能否顺利实现。文献^[1,9]从互联电力系统(Interconnected Power System)的规范出发，对风能和太阳能光伏发电的应用模式所进行的研究表明，应用风能和光伏发电的最好方式是就地开发与消纳：① 风能和光伏发电的就地开发与消纳模式同大规模远距离输送模式相比，其向负荷中心供电的全社会成本具有明显优势，而可靠性成本、受端系统过网费和网损成本是使得两种开发模式供电成本存在差距的主要原因，其中可靠性成本是最核心要素。进而，伴随着风光设备成本的持续快速下降，就地开发与消纳模式的供电成本优势还将更加显著；② 在以燃煤火电为主要调节容量(我国现时如此)的情况下，采用就地开发与消纳模式时负荷中心所能实现的风能和太阳能光伏发电渗透率最高，且在该模式下，通过采取多种改善措施后，风电和光伏发电电量渗透率可实现 2050 年的远景目标。故可再生能源应用的主流形式将是就地开发就地消纳，这一结论与 Rifkin 的构想^[注]是一致的。

注：Jeremy Rifkin 的第三次工业革命(能源互联网)构想^[10]是：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套强大的新基础设施，即 Rifkin 所谓的第三次工业革命。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”中彼此分享，就像现在我们在在线创造和分享

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。

3.3 智能电网需要漫长的过渡,其实施将支持和伴随整个能源转型的过程

分布式可再生能源(特别是光伏)发电、住宅储能以及电动车辆技术的发展,将共同促进自主发电和消费的增长,会在未来的10~20年内从根本上改变电网的结构。未来电网的组成结构完全不同于传统电网,它在配电和发电领域中的影响具有颠覆性。但是,一方面由于智能电网本身的复杂性,涉及许多技术、体制和社会问题,需要漫长的过渡、持续的研发和多种技术的长期共存,且电网变迁的过程必将改变整个行业的业务模型^[11];另一方面,能源转型规模十分巨大,需要很长的时间,往往是持续几十年,特别是分布式可再生能源的开发与利用才刚刚开始,距离实现高渗透率还有相当长的路要走。所以适应分布式可再生能源消纳的、具有即插即用能力的智能电网的实施将支持和伴随整个能源转型的过程^[1]。

事实上,文献[2]已指出,智能电网(Smart Grid)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。但是短期内可以着眼于实现一个较为智能的电网(Smarter Grid),利用已有的或即将可以配置的技术使目前的电网更有效,在提供优质电力的同时,还可以创造较大的社会效益(如改善环境)。

4 结论

1) 未来的能源构成将由现在的以化石能源为主、可再生能源为辅转变为以可再生能源为主。而且应用风能和光伏发电的最好方式是就地开发与消纳,分布式是其应用的主流模式。分布式可再生能源(特别是光伏)发电、住宅储能以及电动车辆技术的发展,将共同促进自主发电和消费的增长,会在未来的10~20年内从根本上改变电网的结构,这个电网就是智能电网。它会支持和伴随能源转型的漫长过程,而且其本身的复杂性也需要漫长的过渡、持续的研究和多种技术的长期共存。

2) 智能电网将加强电力交换系统的方方面面,包括发电、输电、配电和消费等,智能电网的开发需要紧紧围绕这些功能展开,以期最大限度地获取效益。设想中的智能电网将是分级(输电网、配电网、微网、建筑单元的电网)的分布式智能的基础设施,它具有极强的抗扰能力(鲁棒性),可以接受高比例分布式的风能和太阳能发电,可以抵御各种内、外部的扰动,从而具有较强的安全性和韧性。同时赛

博安全标准已成为智能电网标准的重要组成部分。这一切使得智能电网的实施,在异常天气的出现日益频繁和赛博攻击愈演愈烈的形势下,越发成为一个紧迫的任务。

参考文献

- [1] 余贻鑫,等. 智能电网的基本理念与关键技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [2] U.S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. The smart grid: an introduction [EB/OL]. [2009-11-03]. <http://www.oe.energy.gov/1165.htm>.
- [3] WU F F, VARAIYA P P, HUI R S Y. Smart grids with intelligent periphery: an architecture for the energy internet[J]. *Engineering*, 2015, 1(4): 436-446.
- [4] 余贻鑫, 马世乾, 徐臣. 配电系统快速仿真与建模的研究框架[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(10): 1675-1681. YU Yixin, MA Shiqian, XU Chen. A research framework for the distribution fast simulation and modeling[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(10): 1675-1681.
- [5] Presidential-policy-directive-critical-infrastructure-security-and-resil[EB/OL]. [2013-02-12]. <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office>.
- [6] PANTELI M, MANCARELLA P. The grid: stronger, bigger, smarter[J]. *IEEE Power & Energy Magazine* 2015, 13(3): 58-66.
- [7] LIANG Gaoqi, WELLER S R, ZHAO Junhua, et al. The 2015 Ukraine blackout: implications for false data injection attacks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(4): 3317-3318.
- [8] NIST (US). NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 3.0.[EB/OL]. [2014-09]. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1108r3>.
- [9] SUN Bing, YU Yixin, QIN Chao. Should China focus on the distributed development of wind and solar photovoltaic power generation? A comparative study[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 421-439.
- [10] RIFKIN J. The third industrial revolution[M]. New York: Palgrave Macmillan, 2011.
- [11] 余贻鑫, 刘艳丽. 智能电网的挑战性问题[J]. *电力系统自动化*, 2014, 39(2): 1-5. YU Yixin, LIU Yanli. Challenging issues of smart grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 39(2): 1-5.

收稿日期: 2019-08-14

作者简介:

余贻鑫(1936—),男,中国工程院院士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统安全性与稳定性、配电网规划、智能电网等。E-mail: yixinyu@tju.edu.cn

(编辑 姜新丽)