

工业4.0对电力系统自动化的影响

文/ABB(中国)有限公司厦门 陈虹铮

我国城市电网不断升级改造，对电力系统自动化的要求不断升级。从新能源和智能电网的发展和应用，智能化设备的诞生等方面的变化来阐述工业4.0对电力系统自动化的影响。并结合ABB Ability™的实际例子来体现工业4.0的影响给智能制造智能运行带来的各种进步。

随着工业4.0的到来，“互联网+”给社会带来了巨大的变化。从现金交易到扫描支付，“互联网+”改变了每个人的生活习惯。同样地，“互联网+”也给电力系统自动化带来了巨大的影响。

我国城市电网的不断升级改造，对电力系统自动化的要求不断升级。电力系统自动化是应用各种具有自动检测、决策和控制功能的装置，通过信号系统和数据传输系统对电力系统各元件、局部系统或全系统进行就地或远方的自动监视、调节和控制，保证电能质量和电力系统安全经济运行。

电力系统自动化的发展是与电力系统日益提高的技术需求息息相关的，同时各个国家的能源政策特别是新能源政策及电力市场的市场化进程对整个电力自动化行业都产生了深远的影响。当今的电力系统自动化面临着诸多的机遇与挑战。一方面，包括信息技术的高新技术发展为电力系统自动化的发展提供了基础和条件，使得电力系统自动化可以更加数字化和智能化，例如：IEC 61850标准定义了过程层的通信，非传统一次设备（光/电互感器等）集成数字通信接口，在线监视和优化手段提高了系统的效率和可靠性等；另一方面，能源和环保方面又对电力系统自动化提出了更高的要求，电力系统自动化要为“加快建设资源节约型、环境友好型社会，坚持节约发展、清洁发展、安全发展，实现可持续发展，落实节约资源和保护环境基本国策”服务。例如：可再生能源（光电风电等）的接入和监控，智能电网，资产健康管理、智能管理的研究等。

可再生能源

近年来，在应对全球气候变暖的大背景下，大力发展可再生能源以替代化石能源已成为众多国家能源转型的大势所趋，节能环保的发电方式越来越受到各国的青睐。在目前众多备选的可再生能源类型中，太阳能无疑是未来世界最理想的能源之一，在各国中长期能源战略中占有重要地位。太阳能是一种清洁的永续能源，自地球上的生命诞生以来，就主要以太阳提供的热辐射能生存。在化石燃料日趋减少的情况下，太阳能已成为人类使用能源的重要组成部分，并不断得到发展。太阳能的利用有光热转换和光电转换两种方式，太阳能发电是可再生能源中最具开发潜力和发展前景。

太阳能发电有两种方式：一种是光—热—电转换方式；另一种是光—电直接转换方式。

1) 光—热—电转换方式。通过利用太阳辐射产生的热能发电，一般是由太阳能集热器将所吸收的热能转换成工质的蒸气，再驱动汽轮机发电。前一个过程是光—热转换过程；后一个过程是热—电转换过程，与普通的火力发电一样，太阳能热发电的缺点是效率很低而成本很高，估计它的投资至少要比普通火电站贵5~10倍。

2) 光—电直接转换方式。该方式是利用光伏效应，将太阳辐射能直接转换成电能，光伏发电技术的关键元件是太阳电池。太阳电池是一种由于光伏效应而将太阳光能直接转化为电能的器件，是一个半导体光电二极管，当太阳光照到光

电二极管上时,光电二极管就会把太阳的光能变成电能,产生电流。当许多个电池串联或并联起来就可以成为有较大输出功率的太阳能电池方阵了。太阳能电池是一种大有前途的新型电源,具有永久性、清洁性和灵活性三大优点。太阳能电池寿命长,只要太阳存在,太阳能电池就可以一次投资而长期使用;另外,与火力发电、核能发电相比,太阳能电池不会引起环境污染。

据报道,德国是全球太阳能光伏发电累计装机容量最多的国家,太阳能光伏发电是近年来德国新增装机最大的电源。到2011年底,德国太阳能光伏发电装机容量累计达2 500万kW,太阳能光伏发电已占其全部电力消费的2%。

德国促进太阳能光伏发电发展主要有以下四项措施:一是通过颁布法律,要求电网公司必须全额收购太阳能光伏发电的上网电量;二是颁布太阳能光伏发电上网的固定电价,维持20年不变,独立太阳能光伏电站上网电价随全国安装规模扩大,从19.2欧分/kW·h逐步降为16.0欧分/kW·h,与建筑结合的用户侧太阳能光伏发电系统,按照装机容量大小,上网电价为21.8~26.2欧分/kW·h;三是提前设定电价下降幅度,上述电价每年下降9%,并根据安装规模进行微调,以促进光伏成本下降,并将补贴总额设定在可预期的范围内。

德国政府的措施促进了家庭用户安装光伏发电的积极性,并在工业4.0的推动下促进了光伏发电数字化智能化,实现了光伏发电实时在线监测。图1~图4所示的数据来自于笔者一位德国同事家。

目前我国也在大力促进新能源产业的发展和建设。在政策体系和发展机制逐步完善的同时,光伏电池的基础研究与技术创新能力取得了长足进步,建立了比较完整的材料、生产装备、系统集成和辅助服务的产业体系,光伏电池转化效率

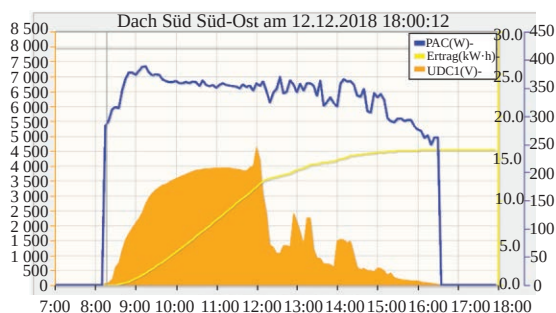


图1 日光伏发电量统计图

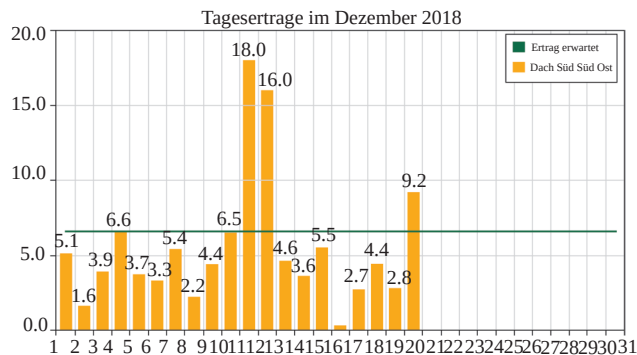


图2 月光伏发电量统计图

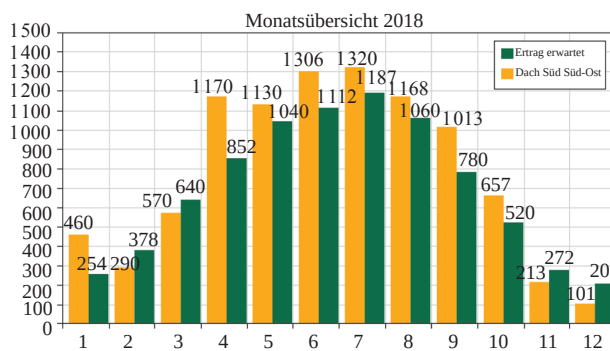
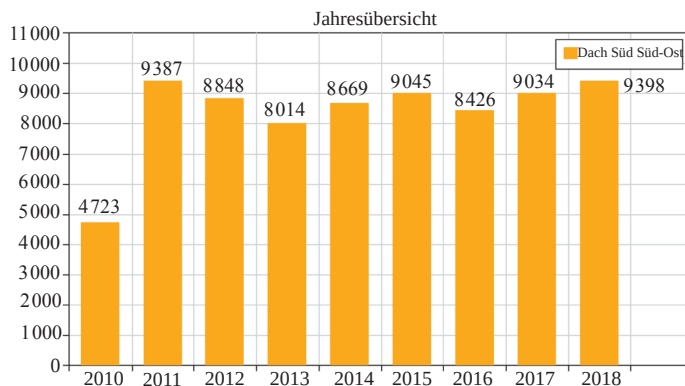


图3 年光伏发电量统计图



Tagesertrag:16 kW·h(~11.2Kg CO₂,6.26€)Monatsertrag:72 kW·h(~50.4 KgCO₂,28 €)
Jahresertrag:9 369 kW·h(~6558KgCO₂,3667 €)Gesamtertrag:75 489 kW·h(~52.8to.CO₂,29546 €)
Leistung(PAC):0W(4 884 W max.)Relative Leistung:0%(60%max.)
Spez.Ertrag:2 kW·h/kWp

图4 历年光伏发电量节能减排及收益统计图

持续提高,产业链全面优化,光伏电池技术和成本的全球竞争力进一步提高。结合电力体制改革、电价机制改革,完善太阳能发电的政策体系和发展机制,建立有利于分布式可再生能源发电发展的市场竞争机制和电力运行管理机制,为太阳能发电产业发展提供良好的体制机制环境。通过新能源微网工程与新能源示范城市建设开展政策和发展模式创新,探索建立适合可再生能源发展的电力系统运行和管理模式。在“十二五”发展的基础上,继续推进太阳能发电产业规模化发展,到2020

年太阳能发电总装机容量达到5 000万kW，使我国太阳能发电产业达到国际先进水平。

智能电网

21世纪的电力系统正面临着不断增加的电力需求，备受关注的环境问题，新能源的广泛应用，以及对电网效率和可靠性等方面的更高要求共同形成的严峻挑战，智能电网是应对这些挑战的必然选择。智能电网以日新月异的信息通信技术为基础，结合先进的电网自动控制、高压直流输电、灵活交流输电、智能设备和变电站自动化等电力技术，构建面向未来的智能化电力网络，涵盖了从发电、输电、配电到用电多个层次，涉及到电网运行管理和技术发展的方方面面。

“智能”在电力系统中并非一个全新的概念。比如，变电站自动化通过采集现场信息，汇总到控制中心，并进而实现复杂且高度自动化的功能，在十多年前就已经成为行业发展的方向。同样，SCADA、无功补偿及馈线自动化也被广泛应用于降损增效。但是，传统的电力系统设计通过单向的输配电系统将大型电厂的电力输送到远方的负荷中心，这种由上而下的结构无法满足双向、网状的分布式电源的系统运行要求。数字化变电站、大规模可再生能源接入、智能仪表，电量交易及需求侧管理等都是智能电网的重要研究方向。

智能电网中，输电网的智能化也是关键一环，特别对于我国有着重要的现实意义。随着特高压、超高压交直流电网的建设，建设智能输电网以提高电网的安全稳定性和实现全国能源的合理分配尤为重要。智能输电网的核心之一是通过高压直流输电、柔性交流输电等先进技术，变被动控制方式为主动控制方式。

智能电网并非颠覆性的变革，而是在现有电网的基础上，逐步发展为更加智能、高效和环境友好的未来电网。在智能电网的概念也在不断的扩充和完善的同时，政府对新能源特别是分布式能源的发展政策及电力系统改革的进程均会对智能电网的发展产生一定的影响。目前，国际社会对于智能电网的研究刚刚起步，我们需要高度重视，与国际紧密接轨，把握技术前沿，研究有中国特色的智能电网解决方案。

1. IEC 61850的应用

IEC 61850是变电站自动化的国际标准，已

于2005年生效。保护和变电站自动化行业认为，这个标准的颁布是电力技术上的一个突破。

IEC 61850标准具有很多优势。

1) 它对变电站内IED（智能电子设备）间的通信进行分类和分析，定义了变电站装置间和变电站对外通信的10种类型，针对这10种通信需求进行分类和甄别。

2) 针对不同的通信，不同的优化方式。引入GOOSE（面向通用对象的变电站事件）、SMV（采样测量值）和MMS（制造报文规范）等不同通信方式，满足变电站内装置间的通信需求。

3) 建立装置的数字化模型，理顺功能、IED、LD（逻辑设备）、LN（逻辑节点）概念的关系和隶属。统一功能和装置实现直接的规范。

4) 建立统一的SCD（变电站系统配置描述文件），使得各个变电站尽管在电压等级、供电范围和一次接线方式等不尽相同的情况下，依然能够建立起一个统一格式、统一实现方式和各个厂商通用的变电站配置。

5) 首次提出过程层概念和解决方案，使得电子式互感器得以推广和应用。

IEC 61850标准由于其优越性已得到用户的广泛接受。其标准本身也在不断地发展，针对变电站自动化中关于电能质量、状态监视等逻辑节点的扩展及其外延发展诸如覆盖变电站到调度之间的通信及变电站之间通信的课题均在研究中，而采用IEC 61850相关技术针对风电场、水电厂控制和分布式能源电力自动化系统的相关标准均在制订中。

与此同时，新型传感器（如光纤电流传感器FOCS）开始逐渐取代传统的CT/PT。新型传感器具有体积小、高带宽、大动态范围、高测量准确度和抗电流饱和、抗电压谐振等优点。此外，对于数字信号处理，新型传感器可以直接提供与变电站自动化系统中的过程层设备之间的接口，从而实现符合IEC 61850 标准的过程总线（IEC 61850-9-2）的通信，减少对二次电缆连接的需要，使安装和调试工作简化。控制电缆也被网络线所取代，从而实现成本更低、运行更可靠的变电站自动化系统。

2. 智能输变电的关键技术

国家电网公司对智能变电站的定义是统一坚强智能电网的重要基础和支撑。按照“统一规

划、统一标准、统一建设”的工作方针，规范开展智能变电站的建设。

智能变电站采用先进、可靠、集成、低碳和环保的智能设备，以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求，自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能，并根据需要支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策和协同互动等高级功能的变电站。

GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) 是IEC 61850标准中用于满足变电站自动化系统快速报文需求的机制，主要用于实现在多IED 之间的信息传递，包括传输跳合闸信号（命令），具有高传输成功概率。基于GOOSE网络传输代替传统的硬接线实现开关位置、闭锁信号和跳闸命令等实时信息的可靠传输。

SMV (Sample Measurement Value) 采样值数据帧通过硬件地址广播或者组播发送数据值。目前，厂家大多选择遵循IEC 61850-9-2 LE

协议的广播或者组播数据帧。IEC 61850-9-2 LE 具体定义了采样值的两种数据形式：对应用于保护的采样值，采样率为每个周波采集80点；对应用于计量的采样值，采样率为每个周波256点。IEC 61850-9-2的传送数据内容和数目均可配置，更加灵活，数据共享更方便，能灵活满足各种变电站的需求，是目前技术发展的趋势。目前设备采样数据传输均采用IEC 61850-9-2，并采用IEEE 1588网络时钟同步协议来实现同步采样。基于IEEE 1588的对时方式能够与全站的通信网络复用，结构简单，对时准确度可高达10~100 ns，不仅可以满足过程层电子式互感器的采样准确度，同时也完全能够满足变电站自动化系统所有的对时功能要求。

应用GOOSE通信技术以及在IEEE1588高对时精度的配合下的SMV采样值技术，可以在无主站控制的情况下，实现快速网络自愈，提高电网的供电可靠性。如图5所示。

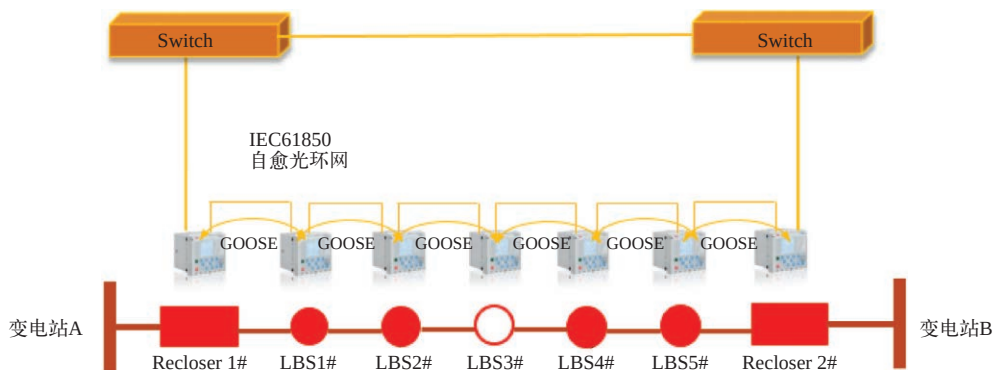


图5 智能分布式配电网拓扑图

工业4.0与智能设备

1. 工业4.0

工业4.0有五大特点。

1) 互联。互联工业4.0的核心是连接，要把设备、生产线、工厂、供应商、产品和客户紧密地联系在一起。

2) 数据。工业4.0的数据包含产品数据、设备数据、研发数据、工业链数据、运营数据、管理数据、销售数据和消费者数据等。

3) 集成。工业4.0将无处不在的传感器、嵌入式终端系统、智能控制系统和通信设施通过通信协议形成一个智能网络。通过这个智能网络，使人与人、人与机器、机器与机器、以及服务与服务之间，能够形成互联，从而实现横向、纵向和

端到端的高度集成。

4) 创新。工业4.0的实施过程是制造业创新发展的过程，制造技术、产品、模式、业态和组织等方面的创新，将会层出不穷，从技术创新到产品创新，到模式创新，再到业态创新，最后到组织创新。

5) 转型。对于中国的传统制造业而言，转型实际上是从传统的工厂转型到4.0的工厂。整个生产形态上，更加柔性化、个性化和定制化；从大规模生产，转向智能制造生产。这是工业4.0一个非常重要的特征。

工业4.0依托传感技术、物联网技术、网络安全保证、运用大数据和云计算平台实现人工智能。

国家电网对智能设备的技术要求如下。

2) 测量数字化。设备及其附属组件的基本状态信息的数字化,即对电网运行所需基本状态参量实现就地数字化测量。

4) 状态可视化。基于自检信息和设备其他信息,实现设备状态的自诊断,即对其他相关系统而言,设备状态是可视的。为此,自诊断结果应以故障部件、影响和发生几率进行表述。

5) 信息互动化。与智能调度系统互动。智能设备将自诊断结果送到调度系统,使其成为调度决策和设备故障预案制定的基础信息之一。与设备运行管理系统互动,包括智能组件自主从设备管理运行系统获取非自检测设备状态信息,以及将综合自诊断结果送到设备运行管理系统。

工业4.0让设备赋予了人工智能，让设备可以沟通交流，互联互通。设备资产健康得到保障，为智能制造智慧运行提供了前提条件。

随着科技的发展，传统行业借助数字技术不断的提升效率和可靠性，颠覆传统认知。作为电力和自动化的领导者，ABB一直以技术为驱动，以行业发展为先导，不断以更有效、更可靠的产品促进行业的发展。2017年ABB Ability™战略的发布加快了ABB以数字化为核心驱动的理念。如图6所示。



ABB在数字化领域，特别在设备资产健康管理方案上有着超过20年的实践经验。ABB

Ability™资产健康管理解决方案可有效解决设备维护困难、运维成本高、设备的失效不能提前预测，而造成非计划停电的重大损失等问题。ABB依托在电气产品和系统方面深厚的产品技术以及多年的数据积累，采用最新的数字传感技术和结合机理模型的机器学习诊断技术能够能够提早发现问题，极大缩减运营成本，开启智慧运维新时代。如图7所示。

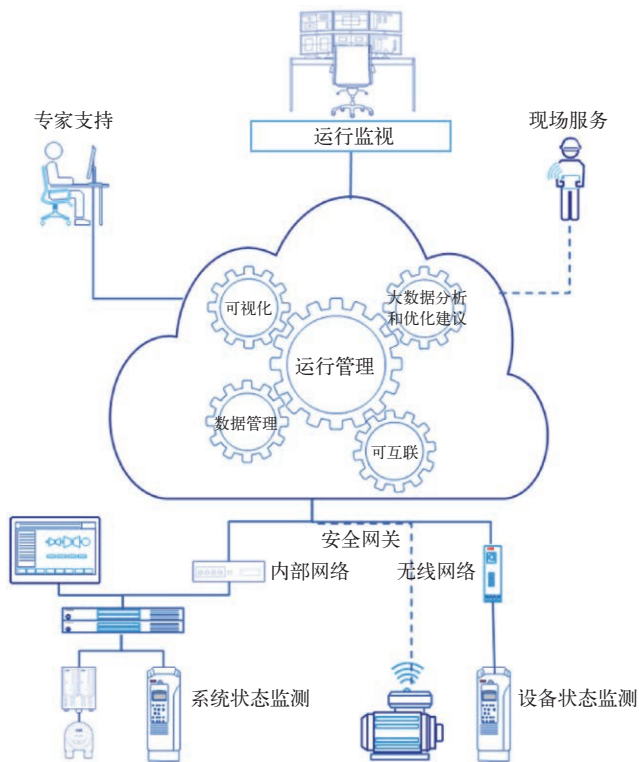


图7 ABB Ability™架构示意图

ABB Ability™将ABB丰富的产品知识与先进的传感器技术相结合，通过安全的数据管理与传输，以及不断的大数据算法优化，帮助用户提供实时的设备健康状态信息，为客户实现智能制造智慧运行管理的全套解决方案。

ABB配电系统事业部在2018年6月发布了MyRemoteCare智能资产健康管理云平台。截止目前已经连接了1 000多套智能开关设备，为客户提供可靠的资产健康信息和运维建议。

结束语

从工业4.0的概念到《中国制造2025》的国家战略，数字化转型已成为中国企业产业升级和生产率提升的一个重要推动力。工业4.0对电力系统自动化指明了新一轮变革和创新的发展方向。EA