

# 智能电网与现代电力电子技术

“智能电网”是美国电力科学研究院对下一代电网结构提出的设想。该设想从提出以来就受到业内外人士的极大关注，其具体内容至今仍为学术界和企业界争论不休。而在争论的同时，世界上许多国家已经积极开展了相关研究，我国也将发展智能电网逐渐提升到国家战略层面的重要地位。有鉴于此，在综合研究了现有相关文献如 Smart Grid、Intelligent Grid、Gridwise 及 Modern Grid 等的基础上，阐述了智能电网的基本概念，对比了智能电网和传统电网的异同，解析了智能电网的主要构成、典型特征及其核心支撑技术，重点论述了现代电力电子技术在智能电网构建中所起的重要作用，具体涉及四大领域：输配电领域、电源领域、智能家电领域、新能源和分布式发电领域，使读者对智能电网与现代电力电子技术之间的密切联系有更加深入的认识，为推动我国“坚强的智能电网”建设提供理论参考。

臧春艳/华中科技大学电气与电子工程学院

裴振江 苟锐锋 朱 静 孙 伟/西安电力机械制造公司



臧春艳/讲师

**关键词/Keywords**

智能电网 ·  
现代电力电子技术 ·  
电源 ·  
智能家电 ·  
分布式发电 ·

近年来，“智能电网”这一新概念逐渐受到国内外电力专家的青睐。智能电网主要是运用先进的网络分析技术及新的智能化技术手段，将电力企业的各种设备、控制系统、生产任务及工作人员有机地联系在一起，在一种“公共信息模型”的基础上自动收集和存储数据，对供电系统的运行及电力企业的经营管理进行全面、深入的分析，客观正确地优化其资产管理和供电服务<sup>[1,2]</sup>。通俗的说，智能电网就是通过智能传感器把各种设备、资产连接到一起，形成一个统一的客户服务集成系统，从而对各类数字化信息进行挖掘、整合和分析，以此来降低成本，提高效率，提高整个电网的可靠性，使运行和管理达到最优化，从而让管理者清楚的了解网络运行状况，更好的管理电力

网络<sup>[3]</sup>。

目前智能电网已经成为电力行业和相关科研机构的热议话题。据美国的爱迪生电力研究所估计，为了改造智能电网，政府对基础设施的改造将花费数十亿美元，包括计算机、传感器和网络系统，这对 IT 和网络公司来说是个巨大的新市场。目前已有电气、IT、电信、互联网巨头以及一些投资机构对此产生了浓厚兴趣，包括 GE、IBM、西门子、Google、Intel、高盛等大公司及投资银行都通过各个渠道积极介入该领域<sup>[4,5]</sup>。欧洲研究委员会 2006 年 1 月出版了《The Platform's Vision Paper》一书，对“智能能源网”的相关问题进行了概述<sup>[6]</sup>。2007 年 10 月，我国华东电网正式启动了智能电网的可行性研究项目<sup>[7]</sup>。2008 年 5 月，位于美国西部科罗拉多州的波尔得（Boulder）成为全美第一个智能电网城市<sup>[8]</sup>。遗憾的是，在智能电网蓬勃发展的同时，至今尚没有一个智能电网的准确定义。这引起了研究者们对深入探寻智能电网的内涵与外延、组成结构和核心支撑技术的极大兴趣。

现代电力电子技术是以功率处理为对象，以实现高效率和高品质用电为目标，通过采用电力半导体器件，并综合自动控制、计算机（微处理器）技术和电磁技术，实现电能的获取、传输、变换和利用<sup>[9]</sup>。据估计，发达国家在用户最终使用的电能中，有 60% 以上的电能至少经过一次以上电力电子变流装置的处理。因此，在智能电网的设计框架中，现代电力电子技术无疑是一大关键支撑技术，将在未来的智能电网建设中扮演着十分重要的角色。

### 智能电网概述

传统电网和智能电网在组成结构上的异同如图 1 和图 2 所示。对比这两图可以发现，智能电网的各组成部分在架构上比传统电网联系更为紧密，且新增了一些辅助性组件如柔性交流输电 (FACTS)、输电线路实时动态增容系统 (DTCR) 技术装置等，还增加了一些实时响应平台，以处理各种突发事件。这使得智能电网在灵活性、可靠性和交互性等方面大大优于原来的传统电网。

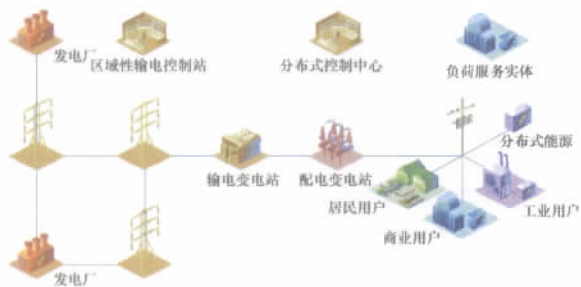


图 1 传统电网架构示意图



图 2 智能电网架构示意图

综合学术界现有的一些观点来看<sup>[10-15]</sup>，智能电网主要具有以下七大特征：

1) 自愈性。所谓“自愈性”，是指无需或仅需少量人为干预，实现电力网络中存在问题元件的隔离或使其恢复正常运行，最小化或避免用户的供电中断。自愈是电网实现安全可靠运行的主要功能。通过进行连续的评估自测，智能电网可以检测、分析、响应甚至恢复电力元件或局部网络的异常运行。

2) 安全性。无论是功率流还是信息流系统遭到外部攻击，如自然灾害、外力破坏和黑客攻击等，智能电网均能有效抵御由此造成的对电力系统本身及其相关领域造成的伤害，保证人员、

设备及电网的安全。

3) 交互性。智能电网鼓励和包括末端的电力用户，使之与电网进行自适应交互，并将其视为智能电网的组成部分之一。从而可以促使电力用户在智能电网中发挥更多积极作用。

4) 经济性。也即智能电网对现有的电网资产和设备进行整合、优化，提高它们的利用效率，从整体上实现电网运行和扩容的优化，降低电网的投资及运营成本。

5) 优质高效。在高数字化程度和高科技的主导经济模式下，电力用户能够得到优质高效的电能，实现对电价的实时了解和对分时段用电的合理选择。

6) 清洁环保。既能适应大电源的集中接入方式，也能适应分布式发电系统的“即插即用”方式，支持风能、太阳能、生物质能和地热能等可再生能源的大规模应用，同时协调发电和储能选择，将传统的火力、水力发电及核能发电在新的能源结构中加以整合，尽可能降低对环境的污染程度。

7) 市场化程度高。智能电网所采用的信息技术对原有的电力市场无疑有提升和促进的作用。同时，由于智能电网引入了多方投资者和参与者，涉及的行业领域及受益面相当广泛，将逐渐在资本市场上形成“非零和博弈”的状况，从而推动传统电力系统进一步向市场化方向转变。

加拿大电力系统专家 Scott J. Anders 在总结 San Diego 市的智能电网建设经验中<sup>[16]</sup>，对目前电网的现状和未来的智能电网进行了一番比较，如图 3 所示。

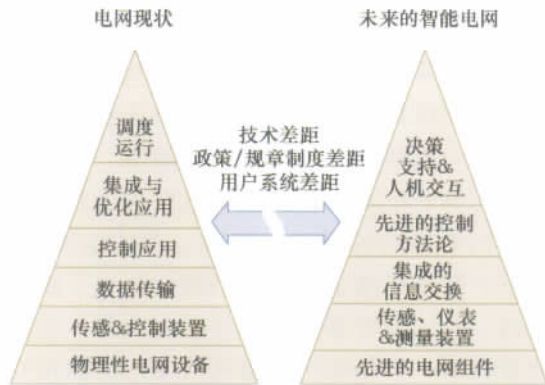


图 3 电网现状与未来的智能电网

图3揭示了智能电网的一些关键性支撑技术。总的说来,智能电网主要需要六大技术来实现其功能<sup>[17]</sup>:①灵活的网络拓扑。②基于开放体系并高度集成的通信系统。③传感、仪表与测量技术。④现代电力电子技术、超导和储能技术。⑤先进的系统监控方法。⑥高水平的运行人员决策辅助系统。

### 现代电力电子技术在智能电网中的应用

智能化电网的核心技术是数字化电网、分布式能源系统和信息化家电<sup>[5]</sup>。为此,各国已有一些相关的技术储备。特别是现代电力电子技术的长足发展,为智能电网的实现奠定了坚实基础。现代电力电子技术与智能电网的建设密不可分,具体表现在以下一些领域。

#### 1. 输配电领域

智能电网对电能质量和电网工作状况的稳定有较高要求。众所周知,这些要求的实现需要电力系统有无功补偿和谐波抑制技术的密切配合。近年发展起来的 FACTS 技术主要是依靠电力电子装置才得以实现的。而且许多更加新颖的电力电子装置还在不断涌现,比如薄型交流变换器(Thin AC Converter)、超导无功补偿装置 SuperVAR 等<sup>[18,19]</sup>。SuperVAR 主体构成如图4所示。



图4 SuperVAR 主体构成实物图

另外,在长距离、大容量输电时越来越多的国家倾向于采用直流输电方式,如我国的特高压直流输电线路建设,其送电端的整流阀和受电端的逆变阀一般都采用晶闸管变流装置。类似这种基于电力电子技术的设备在输电网中的应用,可提高电网的输送容量和可靠性。在配电网系统,电力电子装置可用于防止电网瞬间停电、瞬时电压跌落、电压闪变等,以改善供电效果,进行电能质量控制。这些都与智能电网设计的预期功能十分吻合。

#### 2. 电源领域

电力电子装置提供给负载的是各种直流电源、恒频交流电源和变频交流电源。在智能电网中的一些具体应用实例如表1所示。

表1 电力电子装置在电源领域的应用举例

具体应用实例	所需电源类型
变电所操作屏	交流/直流电源
蓄电池充电	直流电源
通信用程控交换机	高频开关电源
大型计算机	高频开关电源
微型计算机	高频开关电源
其他电网用电子装置	直流电源/高频开关电源

#### 3. 智能家电领域

图5是各类型用户在智能电网中的接入示意图。对智能电网来说,庞大的居民及办公用户使用的大大小的家用电器,无疑组成了一个巨大而分散的负荷。



图5 用户在智能电网中的接入示意图

智能家电技术实质上是集现代微电子技术、电力电子技术、信息技术、精密机械加工技术和传感技术等科学理论于一身的高自动化技术。比如节能型空调、冰箱中的变频器,就是现代电力电子技术应用于智能家电领域的典型例子。

#### 4. 新能源与分布式发电领域

传统发电方式是火力、水力发电以及小规模应用的核能发电。进入21世纪后,随着煤、石油及天然气等不可再生资源的逐渐消耗,人们日益感受到能源危机的逼近,越来越重视各种新能源、可再生能源及新型发电方式。其中太阳能发电和风力发电属于发展较快的新能源,但它们受环境制约较大,发出的电力质量较差,需要储能装置缓冲以改善电能质量,这就需要电力电子技术。

小水电用的大型电动机的起动和调速也需要电力电子技术。另外，由于各地区的资源与负荷分布并不均衡，常常采用分布式发电以及微网技术。微网中的分布式电源包括微型燃气轮机、燃料电池、光伏电源、风力发电机、蓄电池和高速飞轮等<sup>[20]</sup>。当需要把这些和大电网相连或彼此互连时，也离不开电力电子技术如图6所示。这已成为一个重要的发展趋势，并将在新能源和分布式发电领域里得到更为明显的体现。

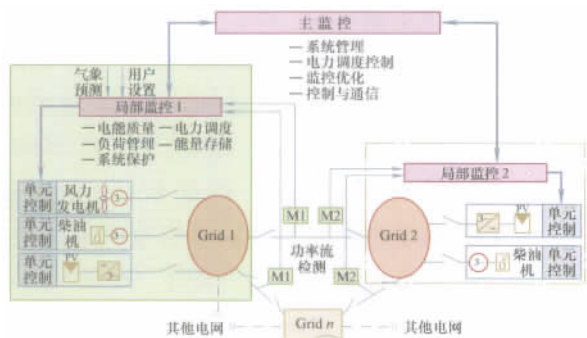


图6 微网互连示意图

### 结束语

在全球能源问题日益紧张的今天，智能电网的出现无疑将是一场引人瞩目和影响巨大的变革。智能电网是以先进的计算机、电子设备和电力开关器件为基础，通过引入通信、自动控制和其他信息技术，从实现对现有电力网络的改造，达到使电力系统更加经济、安全、高效和环保这一根本目标。

在智能电网的几大关键性支撑技术中，蓬勃发展的现代电力电子技术的重要性逐渐凸显。本文着重分析了现代电力电子技术在输配电领域、电源领域、智能家电领域、新能源和分布式发电领域与智能电网之间密不可分的关系，并列举了一些或典型或新颖的应用实例，说明现代电力电子技术对智能电网可以起到多方面的支撑和提升作用。随着新型电力电子器件、电路拓扑及控制技术的不断涌现，人们有理由相信，现代电力电子技术将更好地为智能电网的建设服务。

### 参考文献

[ 1 ] IBM Global Enterprise Consulting Services. Construction smart grid to renovate the operation and management

of utilities [ R ]. 2006.  
 [ 2 ] European Commission. European technology platform smart grids : vision and strategy for europe’s electricity networks of the future [ EB/OL ]. [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf). 2006.  
 [ 3 ] 郝悍勇. IBM 眼中的“智能电网” [ J ]. 电力信息化, 2006, 4 ( 6 ): 24-26.  
 [ 4 ] 孟静. “互联精神”下的智能电网 [ J ]. 中国信息化, 2008 ( 6 ): 62-63.  
 [ 5 ] 韩晓平. 智能电网——信息革命和新能源革命的整合 [ J ]. 电力需求侧管理, 2009, 11 ( 2 ): 5-7.  
 [ 6 ] Christian Sasse. 未来的电力网 [ J ]. 华东电力, 2007 ( 增刊 ): 1-16.  
 [ 7 ] 崔毅敏, 李福岭. 浅谈智能电网和智能网络 [ J ]. 电力信息化, 2008, 6 ( 11 ): 32-34.  
 [ 8 ] Steve Carpenter. Boulder offers a proving ground for a smarter way to do smart grid [ J/OL ]. Electric Light & Power. ( 2008-07-01 ). [http://www.accessmylibrary.com/coms2/summary\\_0286-34997546\\_ITM](http://www.accessmylibrary.com/coms2/summary_0286-34997546_ITM).  
 [ 9 ] 赵玉冰. 浅谈现代电力电子技术的应用和发展 [ J ]. 科技咨询导报, 2007 ( 3 ): 104.  
 [ 10 ] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网 [ J ]. 中国电力, 2008, 41 ( 6 ): 19-22.  
 [ 11 ] 廖斌, 仇宏祥. 标准化的智能电网提升电网安全 [ J ]. 上海电力, 2006 ( 6 ): 584-588.  
 [ 12 ] Atmika Singh, Cihan H Dagli. Multi-objective stochastic heuristic methodology for tradespace exploration of a network centric system of systems [ C ]. IEEE SysCon2009 - 3<sup>rd</sup> Annual IEEE International Systems Conference, Vancouver, Canada, 23-26 March, 2009 : 218-223.  
 [ 13 ] Joe Miller. Principal characteristics of the modern grid [ EB/OL ]. [ 2006-11 ]. [http://www.netl.doe.gov/moderngrid/docs/Miller-MW\\_Summit.pdf](http://www.netl.doe.gov/moderngrid/docs/Miller-MW_Summit.pdf).  
 [ 14 ] Cameron W Potter, Allison Archambault, Kenneth Westrick. Building a smarter smart grid through better renewable energy information [ C ]. 2009 IEEE Power Systems Conference and Exposition, Seattle, USA, 15-18 March 2009, 2009 : 1-5.  
 [ 15 ] Javier Rodriguez Roncero. Intergration is key to smart grid management [ C ]. CIRED Seminar 2008 : Smart-Grids for Distribution, Frankfurt, 23-24 June 2008, 2008 ( 9 ): 1-4.

( 下转第 58 页 )

$$\alpha(E_j, X_i) \leq \alpha(E_j) \leq \sum_{i=1}^m \alpha(E_j, X_i)$$

$$\alpha(E_j) \leq C \leq \sum_{j=1}^n \alpha(E_j)$$

显然,  $Kx_i$  和  $K$  从某种程度上, 反映了系统的健壮性;  $Ke_j$  反映了各种隐患的风险;  $S(E_j, X_i)/\alpha(E_j, X_i)$ 、 $Ke_j/C(E_j)$  等比值反映了补救措施的效率。

对于多种系统安全措施, 如何取舍的问题, 就需要关注  $Ke_j$ 、 $S(E_j, X_i)/\alpha(E_j, X_i)$  及  $Ke_j/\alpha(E_j)$  等指标值, 根据具体情况而权衡比较。

### 结束语

经过本文的剖析, 安全的含义比较清晰, 狭义的安全包括机密性、完整性、自检测性、健壮性和可恢复性等多个方面。安全的各个特性之间也不是相互独立的, 例如自检测性可以作为机密性的补充和加强, 机密性、可恢复性都影响系统的健壮性等。

至于如何实现安全, 则没有统一的理论模型, 需要根据具体情况和需求有所取舍, 风险理论提供了一定的选择依据。

安全问题是很大的课题, 本文侧重从纵向探讨了安全的各个方面, 认为进一步的工作包括从横向加强比较和联系、涵盖安全各个方面的整体安全模型理论以及相关的定量研究。

### 参考文献

[ 1 ] Bell D E, LaPadula L J. Secure computer systems : mathematical foundations [ R ]. USA : Air Force Systems Command , Hanscom Air Force Base , Bedford ,

[ 16 ] Scott J Anders. San Diego smart grid study [ EB/OL ]. [ 2006-11-16 ]. [http://www.netl.doe.gov/modern-grid/docs/MW\\_Regional\\_Summit.pdf](http://www.netl.doe.gov/modern-grid/docs/MW_Regional_Summit.pdf).

[ 17 ] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网 [ J ]. 电网技术, 2009, 25 ( 1 ): 7-11.

[ 18 ] Deepak Divan, Jyoti Sastry, Anish Prasai, et al. Thin AC converters-a new approach for making existing grid

M A , 1973.

[ 2 ] Bell D E, LaPadula L J. Secure computer systems : a mathematical model [ R ]. USA : Air Force Systems Command , Hanscom Air Force Base , Bedford , M A , 1973.

[ 3 ] GB 22240—2008 信息安全技术信息系统安全等级保护定级指南 [ S ]. 2008.

[ 4 ] GB 22239—2008 信息安全技术信息系统安全等级保护基本要求 [ S ]. 2008.

[ 5 ] Schweitzer E J. Security news [ J ]. ACM SIGSAC Review , 1988 ( 6 ) : 17.

[ 6 ] Denning D E. An intrusion-detection model [ J ]. IEEE Transactions on Software Engineering , 1987 , 13 ( 2 ) : 222-232.

[ 7 ] 唐涛, 诸伟楠, 杨仪松. 发电厂与变电站自动化技术及其应用 [ M ]. 北京 : 中国电力出版社, 2005.

[ 8 ] 胡炎, 谢小荣, 韩英铎, 等. 电力信息系统安全体系设计方法综述 [ J ]. 电网技术, 2005, 29 ( 1 ) : 35-39.

[ 9 ] 胡炎, 谢小荣, 辛耀中. 电力信息系统现有安全设计方法分析比较 [ J ]. 电网技术, 2006, 30 ( 4 ) : 36-42.

[ 10 ] 胡炎, 谢小荣, 辛耀中. 电力信息系统建模和定量安全评估 [ J ]. 电力系统自动化, 2005, 29 ( 10 ) : 30-35.

[ 11 ] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 基于模型组合和风险理论的 HVDC 系统脆弱性评估 [ J ]. 电力系统自动化, 2005, 29 ( 21 ) : 19-24.

[ 12 ] IEC 61850 Communication networks and systems in substation [ S ]. 2004.

[ 13 ] Biba K J. Integrity considerations for secure computer systems [ R ]. USA : Th Mitre Corporation , 1977.

( 收稿日期 : 2009 - 10 - 27 ) **EA**

---

assets smart and controllable [ C ]. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference , 15-19 June 2008 , Rhodes , Greece , 2008 : 1 695-1 701.

[ 19 ] TVA. SuperVAR™ [ EB/OL ]. [ 2006-08-11 ]. <http://www.netl.doe.gov/moderngrid/docs/Ory.pdf>.

[ 20 ] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析 [ J ]. 电力系统自动化, 2008 ( 7 ) : 24-28.

( 收稿日期 : 2009 - 11 - 24 ) **EA**