

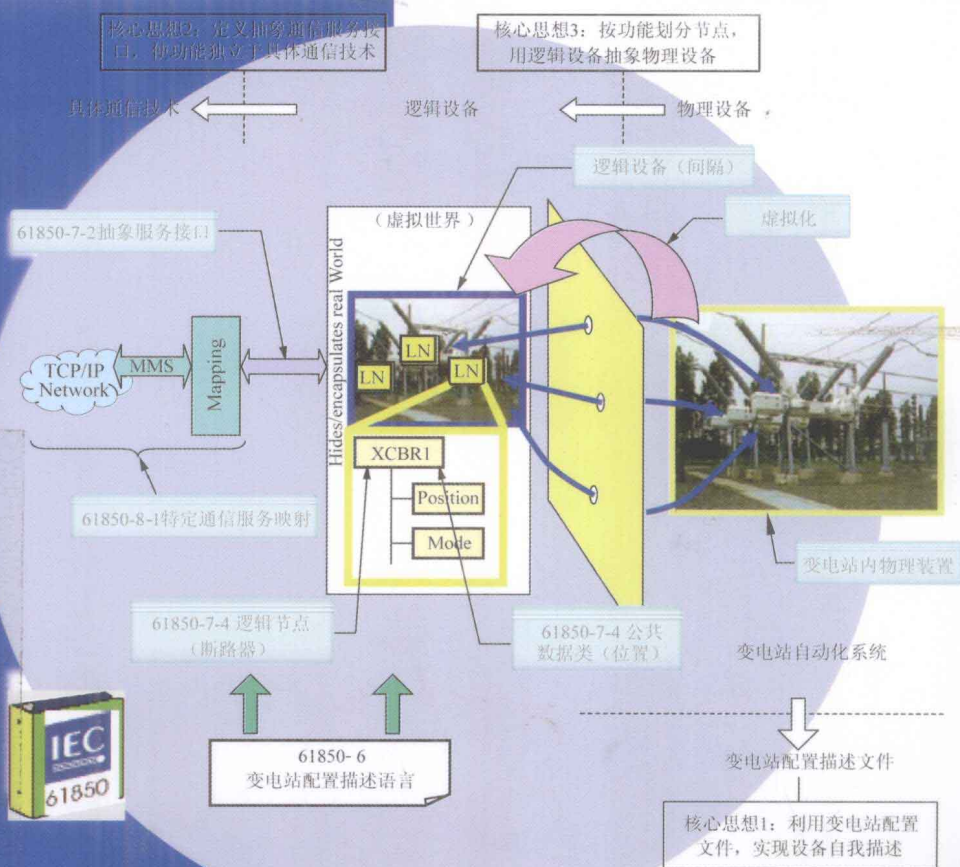
现代电网应用技术丛书

高翔 编著

Smart Substation Technology

# 智能变电站

# 技术



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Smart Substation Technology

# 智能变电站 技术

---

---

高翔 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书阐述了智能变电站与智能电网的关系,全面介绍了智能变电站技术及其在国内外的应用情况。

全书共分9章,主要包括智能电网概述;智能变电站概述;IEC 61850标准;网络通信技术;智能变电站一次设备技术;智能变电站二次系统关键技术;智能化高级应用;智能变电站工程化的关键问题;典型工程应用分析。

本书可供电网运行、设计、科研、试验人员阅读,也可供高等学校电力专业师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

智能变电站技术 / 高翔编著. —北京:中国电力出版社,  
2011.4

ISBN 978-7-5123-1594-5

I. ①智… II. ①高… III. ①变电所—智能技术  
IV. ①TM63

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第065053号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2012年4月第一版 2012年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 18印张 437千字

印数0001—3000册 定价78.00元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

20 世纪 90 年代中期我国开始进行变电站保护和控制微机化应用的试点，目前已经较为全面地实现了智能化继电保护和监控系统。2005 年以来，随着 IEC 61850 标准的应用推广，国内开始了广泛的数字化变电站试点，试点在电子式互感器、过程层数据传输、IEC 61850 实施规范、数字化变电站工程化实施方面取得了大量的创新成果。

从发展趋势来看，我们需要什么样的智能化变电站呢？我的理解是：智能化变电站中一次设备与二次设备之间的结合要更为紧密，既体现在空间距离上也体现在功能配合上，通过相互充分的了解，让变电站更简单更可靠更易维护；智能化变电站中二次专业内部也应充分融合，二次设备应从可靠性、运行维护方便性角度，整体规划一体化设计，成为一个有机的整体；智能化变电站为更智能的电网运行控制系统服务，提供实时准确可靠的数据应成为智能化变电站的重要目标，高级应用的设计应更多地考虑与远程控制的结合而非仅本地应用。

什么是智能化变电站，它的功能、建设、运行、维护、可靠性、成本是什么样的？高翔先生通过本书从多维角度对智能化变电站进行了比较全面的讨论和介绍。智能化变电站相关的很多技术是先进的，但并非先进的技术就是目前阶段最适合的技术，本书能够对相关技术进行比较客观的评价，提供给大家一个比较清醒的认识，也是本书值得推荐的地方。智能化变电站是一个新鲜事物，我们还需要进一步深入研究它，进一步发展它。

沈国荣

随着全球范围内智能电网国家战略的推进，作为智能电网重要物理基础的智能变电站建设已经成为一个新的“热点”，或者说 2005 年起开始的数字化变电站试点建设已经提升为智能变电站试点建设。

“数字化变电站”是指：变电站二次控制系统采用数字化电气量测技术，二次侧提供数字化的电流、电压输出信号。变电站信息实现基于 IEC 61850 标准的统一信息建模，自动化系统实现分层、分布式布置，IED 设备之间的信息交互以网络方式实现。

“智能变电站”是指：由先进、可靠、节能、环保、集成的智能设备组合而成，以高速网络通信平台为信息传输基础，自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能，并可根据需要支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级应用功能的变电站。

智能变电站与数字化变电站既有密不可分的联系，也存在着差别。数字化变电站主要强调手段，而智能变电站更强调目的。概而言之，“数字化是手段，智能化是结果”。

国家电网公司 2009 年 3 月确定了智能电网战略目标，组织研发、设计、运行、试验、制造等各方力量，于同年 4 月完成“发电、输电、变电、配电、用户、调度、信息化”等专题子报告，5 月形成“智能电网综合研究报告”，8 月完成“统一坚强智能电网第一阶段重点项目实施方案综合报告”。同时，明确了 9 个方面的试点方案，第一批 7 个智能变电站试点基建和技改项目等。

为有效落实智能电网实施战略，国家电网公司组织开展了一系列的专题研究和讨论，如变电站技术体系研究，变电站与主站共享建模技术研究，智能开关设备研制及应用技术研究，智能变电站自动化技术支撑能力研究和建设，智能变电站设计建设标准等。2009 年底逐步形成了一系列相关标准，如 Q/GDW 383—2009《智能变电站技术导则》、Q/GDW 393—2009《110（66）kV～220kV 智能变电站设计规范》、Q/GDW 394—2009《330kV～750kV 智能变电站设计规范》、Q/GDW 424—2010《电子式电流互感器技术规范》、Q/GDW Z 410—2010《高压设备智能化技术导则》、Q/GDW 414—2011《变电站智能化改造技术规范》、Q/GDW 441—2010《智能变电站继电保护技术规范》等。2011 年国家电网公司又下达了 58 号文《国家电网公司 2011 年新建变电站设计补充规定》，进一步明确了智能变电站应遵循“安全可靠、成熟适用、经济合理”的基本原则，为智能变电站建设的有序推进确定了基调。

与此同时，中国电力科学研究院结合浙江省试点工程在 2009 年 4 月 20 日进行了 500kV 兰溪、海宁智能变电站相关技术动模试验，同年 11 月 16 日进行了 110kV 大侣、田乐智能变电站相关技术动模试验。2010 年 11 月由国调中心牵头组织进行了更大规模的动模试验，试验保护装置包括了国内主要厂家的保护装置、合并单元、智能单元、录波装置等。试验按两个站进行建模，N 侧为电子式互感器、采用全数字化方案。M 侧为常规互感器，GOOSE 跳闸。N 侧保护模拟量采集、跳闸均为“点对点”模式，构建 SV、GOOSE 网，录波及报文记

录装置从 SV 及 GOOSE 网获取数据。M 侧模拟量常规方式采集，跳闸采用 GOOSE 点对点。通过试验促进了试点工程问题的有效解决，同时，规范了不同厂家的技术实现方案。

2010 年底国家电网系统的第一批智能化试点工程初步投运，基建项目投运了湖南长沙 110kV 金南、山东济宁 110kV 黄屯、江苏无锡 220kV 西泾等变电站。智能化改造项目投运了河南洛阳 110kV 金谷园、山东青岛 220kV 午山、浙江 500kV 兰溪等变电站。

上述工作的推进对于智能变电站相关技术的发展和具有巨大的牵引和推动作用，但是，新技术的稳定性不会“一蹴而就”，需要在工程实践的基础上不断推进技术的成熟度。智能变电站技术除提升变电站“建设、运行、检验”的便利性外，必须满足电网安全稳定运行和经济性的本质性需求，这是新技术得以推广应用的基础。

作为从事电力二次系统专业领域 20 余年的专业工作者，作者经历了整流型保护、晶体管保护、集成电路保护、微机保护不同技术的发展阶段，相信智能变电站技术将演绎一场新的技术革命。“过程层装置就地化、信息传输网络化、运行操作智能化”等特征，将彻底改变变电站建设、运行模式，使变电站建设更容易、运行更简单。

智能变电站技术的成熟与进步将会是个漫长的过程，“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索”。基于 20 余年电力二次控制领域技术应用的感悟，2008 年以来对于智能变电站具体实现技术的探索，结合国家电网公司所形成的智能变电站的相关技术规范、设计方案，试点应用等情况，作者在《数字化变电站应用技术》书稿的基础上，以期通过本书阐述对于智能变电站技术的一些新认识，并希冀与业内同行共同探讨新一轮技术革命的关键要素和发展趋势。

本书第 1 章介绍了智能电网的发展背景、基本特征、技术体系及国内外智能电网规划概况，阐述了智能电网发展的内在驱动力，表述了智能电网发展的基础在于安全和经济价值。

第 2 章分析了智能变电站构成及在电网运行中的作用，阐述了变电站自动化系统的发展历程及常规变电站自动化系统的主要问题，阐述了智能变电站的典型应用特征。提出了智能变电站的核心支撑体系是基于 IEC 61850 的变电站自动化系统，明确智能变电站技术发展在很大程度上是对于综合自动化技术的继承和发展，因此，基于间隔的设计理念应该在智能变电站的技术实现过程中得到严格的遵循和提升。

第 3 章分析了构成智能变电站技术体系核心的 IEC 61850 标准，阐述了标准的核心思想、关键技术、标准特征、工程实施所发现的问题及标准的最新进展。IEC 61850 标准吸收了面向对象建模、组件、软件总线、网络、分布式处理等领域的最新成果，定义了用来交换数据的功能最小单元逻辑节点 LN，通过逻辑节点之间通过逻辑连接交换数据，使得变电站自动化系统基础的 IED 功能模块化实现方式具备了极大的灵活性，这种灵活性恰恰是以信息应用建模的标准化为基础。这样，将使得变电站自动化具备了以应用为导向的信息集成，在未来 IEC 61850 标准工程化的重要检验标准就是独立第三方系统和装置配置工具的成熟度。

第 4 章介绍了构成变电站信息共享基础的网络通信技术，常规变电站的电缆连接模式演变为智能变电站的光缆连接。分析了不同的网络结构对于信息流量、冗余性的影响，变电站信息的处理方案是确保保护、控制等功能“实时性、可靠性、安全性”的重要基础。变电站自动化系统所采用的通信技术均是通信领域内非常成熟的技术，因此，根据变电站信息传输的业务特征设计合理的通信解决方案是智能变电站技术实现的关键环节，如数据同步技术、大流量处理技术、高可靠信息冗余技术等。

第 5 章分析了电子式互感器、断路器智能化、变压器状态监测等技术，智能变电站的发

展目标之一就是智能化一次设备，以便于实现对于变电站关键设备和系统的状态监测，为变电站全寿命周期管理和状态检修提供可靠的技术基础。但是，一次设备智能化的关键问题必须有效解决采取电子元器件对于一次设备可靠性的影响，当然可以考虑采取模块化方案后能在现场比较容易地更换一次设备的电子器件部分，这样，就可以结合一次设备的正常检修，完成生命周期较短的智能化部分电子器件的现场更换，确保一次设备的生命周期不受智能化后的影响，尤其不能由于智能化部分的故障引起一次设备的强迫停役。同时，必须兼顾智能化一次设备的经济价值及智能化部分本身的可靠性。

第 6 章阐述了智能变电站自动化系统的关键技术，自动化系统实际分为：① 用于电网故障快速跳闸的继电保护系统；② 用于电网正常运行信息传输和操作控制的测控/远动，即“四遥”；③ 用于电网事故分析的故障录波/故障测距，及近年来故障信息系统（又称为保护子站系统）；④ 用于电费计量、经济结算的计量系统等。这里针对①、②、③类应用，按照过程层、间隔层及信息分析技术展开。智能变电站的信息具有“全站、唯一、同步、标准”的特征，可避免信息的二义性，在信息应用的有效性上将获得极大的提升。可以比较容易地实现全站网络化测控功能，及获得 PMU 无处不在的应用效果。这样，在确保继电保护技术稳定性的前提下，使得电网运行控制手段可以获得提升，为智能调度技术的发展提供可靠的技术基础。

第 7 章分析了智能变电站可能提升的高级应用功能，核心在于基于 IEC 61850 标准建模后，变电站的信息形态较之常规变电站有很大变化，具备“全站、唯一、同步、标准”的特征。通过配置工具可以实现“源端数据维护”，确保数据、模型的同步性。平台化技术、SVG 技术、面向对象建模技术、面向服务的架构等 IT 技术的发展为基于智能变电站体系的高级应用提高了良好的基础。一次设备在线监测技术的应用，以及二次系统在线监测技术的拓展，使变电站“无人值守”、调控一体化、运维一体化模式获得可靠的技术支撑，变电站关键设备、系统的可观性、可控性大大增强，有利于全生命周期管理模式的推进和深化，电力设备的检修模式和使用效率将有可能获得质的飞跃和提升。同时，智能变电站实现技术具备了 PMU“无处不在”的基础，这样，基于 PMU 的电网动态监控系统实施的代价将大大降低，以往基于 SCADA 电网静态安全控制系统具备了向电网动态控制发展的可能，离线安全分析将逐步让位于在线稳定评估技术，大电网的安全性将进一步提高。电网的事故分析和处理技术由人工决策转向智能决策指日可待，电网的协调控制将更加有序、优化，有可能极大地提升电网运行的经济性、安全性。

第 8 章分析了智能变电站工程化的关键问题，根据电子式互感器本身结构特点、以往的应用情况及采取电子式互感器本质上的经济性需求和可靠性原则，指出电子式互感器的适用场景是 220kV 及以上系统，GIS 宜采用使用罗氏线圈，独立式互感器宜采用纯光纤互感器。断路器智能化的应用主要体现为采用与智能操作箱操作回路一体化设计方案的智能组件技术，实现过程层就地化，简化二次回路。此外，简化隔离开关的隔离式断路器体现了断路器智能化的发展趋势。IEC 61850 标准工程应用初期给人的基本感觉是将“简单问题复杂化了”，以前微机保护是“黑匣子”，现在整个自动化系统成为“黑匣子”了，用户失去了对于智能变电站系统状况的有效判断手段，主要原因是现阶段工具性的支撑非常弱，尤其对于增量的处理会影响整个变电站配置文件。因此，如何在 IEC 61850 体系下利用配置工使用户可以容易地实现变电站数据流的配置，并提供监测手段可实时监测变电站“虚端子”、“虚回路”的

状况，构建完备的测试体系，确保测试的完整性，使智能变电站自动化系统变为用户所熟悉的“透明”系统，这是智能变电站技术能否得以快速推进的重要前提。基于 IEC 61850 的信息具有“自我描述”能力，具备“机读”可能，因此，智能变电站自动化系统可以由计算机按照预先设定的原则，高效率地处理变电站日常运行、维护、检修及事故处理等相关问题，有可能极大地提升变电站自动化系统运行维护水平。

第 9 章介绍了 110、220kV 及 500kV 六个国内外典型站的试点实施情况及所获得的基本经验和效果，从可靠性原理角度分析了智能变电站实现技术对于智能化一次设备、继电保护系统的可靠性。强调必须充分注意到电子式互感器的可靠性将大大低于常规互感器，这点可以从具体工程实施的情况和可靠性框图分析获得证明。最后提出了变电站模块化建设思路，分别分析了 110kV 内桥接线模式，220kV 双母线接线模式，500kV 3/2 接线模式的模块化思路。模块化的核心思想是通过一次设备智能化过程，在工厂内解决一、二次设备之间的标准连接和测试，不同模块之间采用标准的光缆进行信息交互。实现“最大化工厂工作量，最小化现场工作量”，以真正达到“变电站建设更容易、运行更简单”的目标。

本书的形成首先得益于作者在华东电网 20 余年从事保护、控制领域技术工作的经验，正是基于这段工作经验构成了作者对电力系统应用的基本理解，使作者能更多地从电力应用的视角思考智能变电站的相关技术问题，同时，构成了本书基本框架和思路。在此由衷地感谢在华东电网工作期间相关领导和同事的关心、帮助。

本书在一定程度上延续了《电网故障信息系统应用技术》、《数字化变电站应用技术》、《继电保护状态检修应用技术》、《现代电网频率控制应用技术》、《电网动态监控系统应用技术》书稿对于相关问题的探讨。在此，对王梅义前辈、杨奇逊院士、韩祯祥院士对上述书稿相关问题的指点表示深深的敬意！

特别感谢张沛超、刘韶俊、王锡生在书稿形成过程中所提供的帮助，作者在思弘瑞公司工作期间所参与的智能变电站技术具体实践，对于书稿中相关实现技术细节的分析、阐述具有很大的启发性，在此对曾经一起工作奋斗的同事表示感谢！

在弗吉尼亚理工做访问学者期间，得以静下心来系统性地思考一些问题，结合继电保护隐性故障的研究项目，感觉电网对于新技术投入产生效益的本质性要求应该体现为安全性和经济价值，这对于书稿一些观点的最终形成不无益处。

衷心希望本书的出版能为智能变电站技术发展尽绵薄之力，恳请同行对于书稿中的不当之处不吝赐教。

2011 年 12 月于弗吉尼亚黑堡





序  
前言

第 1 章 智能电网概述	1
1.1 智能电网发展背景	1
1.1.1 能源枯竭及环保压力	1
1.1.2 大电网安全稳定运行	1
1.1.3 高可靠性电力需求	2
1.1.4 电力设备和资产高效利用	2
1.1.5 用户参与意识	2
1.2 智能电网基本特点	2
1.2.1 智能电网主要范畴	3
1.2.2 智能电网典型特征	5
1.2.3 智能电网技术体系	6
1.2.4 智能电网效益分析	9
1.3 国内外智能电网发展规划	10
1.3.1 美国 Grid 2030 计划	10
1.3.2 欧洲 Smart Grids 计划	12
1.3.3 国家电网 2020 计划	13
1.4 小结	14
参考文献	14
第 2 章 智能变电站概述	15
2.1 变电站作用及构成	15
2.1.1 变电站一次系统	16
2.1.2 变电站二次系统	28
2.1.3 变电站辅助系统	29
2.2 变电站自动化系统	32
2.2.1 发展概述	32
2.2.2 系统分类及特点	35
2.2.3 主要问题	38
2.3 智能变电站典型应用特征	41
2.3.1 基于智能组件的状态监测	42
2.3.2 基于 IEC 61850 的自动化系统	45

2.3.3 辅助系统模块化、集成化 .....	48
2.4 小结 .....	49
参考文献 .....	50
<b>第3章 IEC 61850 标准 .....</b>	<b>51</b>
3.1 标准概述 .....	51
3.1.1 标准组成 .....	51
3.1.2 基本术语 .....	52
3.1.3 主要应用价值 .....	53
3.2 核心思想 .....	54
3.2.1 面向对象建模 .....	54
3.2.2 应用与通信分离 .....	57
3.2.3 功能自由分配 .....	57
3.3 关键技术 .....	58
3.3.1 面向通用对象的变电站事件模型 GOOSE .....	58
3.3.2 制造报文规范 MMS .....	61
3.3.3 变电站配置描述语言 SCL .....	62
3.4 标准特征 .....	63
3.4.1 一致性 .....	63
3.4.2 互操作性 .....	68
3.4.3 问题及最新进展 .....	72
3.5 小结 .....	76
参考文献 .....	76
<b>第4章 网络通信技术 .....</b>	<b>78</b>
4.1 概述 .....	78
4.1.1 网络通信模型 .....	78
4.1.2 以太网技术 .....	79
4.1.3 交换机技术 .....	82
4.2 网络结构分析 .....	86
4.2.1 基本网络结构 .....	86
4.2.2 网络对时 .....	90
4.2.3 网络通信性能分析 .....	94
4.3 网络流量分析 .....	98
4.3.1 流量 .....	98
4.3.2 大流量处理技术 .....	101
4.3.3 网络技术发展趋势 .....	103
4.4 小结 .....	106
参考文献 .....	107

<b>第 5 章 智能变电站一次设备技术</b> .....	108
5.1 电子式互感器技术.....	108
5.1.1 常规互感器主要问题.....	108
5.1.2 电子式互感器分类.....	109
5.1.3 电子式互感器应用.....	116
5.2 智能断路器技术.....	121
5.2.1 断路器基本特点.....	121
5.2.2 断路器监视技术.....	121
5.2.3 断路器智能操作技术.....	123
5.3 变压器状态监测技术.....	125
5.3.1 变压器基本特征.....	125
5.3.2 变压器故障类型及特征.....	125
5.3.3 变压器在线监测系统.....	127
5.4 小结.....	129
参考文献.....	129
<b>第 6 章 智能变电站二次系统关键技术</b> .....	131
6.1 过程层功能实现.....	131
6.1.1 主要功能.....	131
6.1.2 关键技术.....	134
6.1.3 发展趋势.....	141
6.2 间隔层功能实现.....	142
6.2.1 保护功能分析.....	142
6.2.2 测控功能分析.....	146
6.2.3 保护测控一体化分析.....	148
6.3 信息分析技术.....	151
6.3.1 网络报文.....	151
6.3.2 故障录波.....	155
6.3.3 同步相量测量技术.....	160
6.4 小结.....	161
参考文献.....	162
<b>第 7 章 智能化高级应用</b> .....	163
7.1 信息平台化应用架构.....	163
7.1.1 信息流分析.....	163
7.1.2 平台架构.....	167
7.1.3 面向对象建模.....	171
7.2 智能变电站典型高级应用.....	178
7.2.1 在线监测技术.....	178
7.2.2 智能报警.....	182

7.2.3 智能控制 .....	186
7.3 智能电网相关高级应用 .....	191
7.3.1 动态安全评估 .....	191
7.3.2 事故信息处理 .....	198
7.3.3 电网协调控制 .....	199
7.4 小结 .....	202
参考文献 .....	203
<b>第 8 章 智能变电站工程化的关键问题 .....</b>	<b>204</b>
8.1 电力主设备智能化 .....	204
8.1.1 电子式互感器技术 .....	204
8.1.2 断路器智能化技术 .....	208
8.1.3 变压器状态监测技术 .....	213
8.2 二次系统工程实施 .....	215
8.2.1 二次系统构成特点 .....	215
8.2.2 工程实施关键技术 .....	216
8.2.3 状态监测分析 .....	226
8.3 测试及运行维护的便利性 .....	231
8.3.1 测试关键要素 .....	231
8.3.2 测试方案 .....	236
8.3.3 运行维护方案 .....	237
8.4 小结 .....	238
参考文献 .....	238
<b>第 9 章 典型工程应用分析 .....</b>	<b>240</b>
9.1 典型应用案例 .....	240
9.1.1 110kV 变电站典型案例 .....	240
9.1.2 220kV 变电站典型案例 .....	243
9.1.3 500kV 变电站典型案例 .....	249
9.2 可靠性经济性分析 .....	253
9.2.1 可靠性分析 .....	253
9.2.2 全生命周期管理分析 .....	261
9.2.3 生命周期总成本分析 .....	265
9.3 智能变电站建设模式 .....	267
9.3.1 模块划分原则 .....	267
9.3.2 模块接口要求 .....	268
9.3.3 不同电压等级变电站模块化特征 .....	268
9.4 小结 .....	274
参考文献 .....	274



# 第 1 章

## 智能电网概述

### 1.1 智能电网发展背景

#### 1.1.1 能源枯竭及环保压力

“环保、低碳、可持续发展”已经成为世界各国能源政策的主旋律，长期以来作为二次能源电力的主要来源于一次能源，如煤炭、石油等，世界及我国能源探明量和可开发年限见表 1-1，其中我国煤炭发电比例占 70%~80%，利用煤炭进行发电时会产生大量的二氧化碳，图 1-1 表示四个国家的人口、GDP、能源消耗及 CO<sub>2</sub> 排放的情况。

表 1-1 能源探明量和可开发年限 (年)

一次能源	石油	天然气	煤炭
世界平均水平	42	64.4	122
中国	11.1	32.3	41

随着低碳经济发展的需求，在满足经济和社会发展的基础上，必须研究提高能源利用效率，开发新的可再生利用资源。智能电网的发展目标之一就是减少碳排放，给人类居住提供更友好的环境。各种可再生能源发电以及分布式能源如太阳能、风能、生物质能等发电的快速增长，成为智能电网发展的一个重要特征。2009 年 12 月 7~18 日的哥本哈根会议形成了 2020 年各国对于碳排放的指标明确要求。

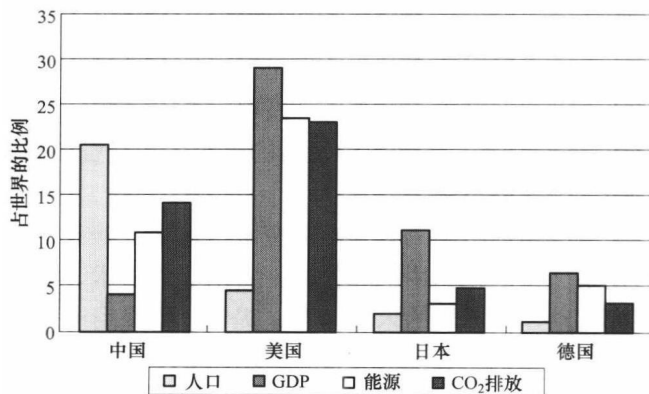


图 1-1 人口、GDP、能源消耗及 CO<sub>2</sub> 排放示意图

#### 1.1.2 大电网安全稳定运行

电网的安全运行始终是电力企业追求的重要目标，随着电网规模的扩大，电网安全运行

问题也越来越引起人们的关注。普通扰动与停电（即，不计大停电）每年的损失就达 790 亿美元（LBNL，2004），纽约独立系统运营商 ISO，趸售电价中 23% 是阻塞成本，全部转嫁给用户（PNNL，2006）。大停电与系统解列更会给社会带来巨大损失。2003 年美加“8·14”大停电造成 40 亿~60 亿美元损失，5000 万人受影响；2006 年西欧“11·4”大停电同样给欧洲带来了巨大的损失，整个事故损失负荷高达 16.72GW，约 1500 万用户受到影响。

因此，寻求更安全的电网一直是电力行业技术发展的目标，作为表征技术发展新领域智能电网的重要目标就是提供先进的技术手段，提升电网的安全运行水平。“信息化、自动化、互动化”是智能电网的基本特征，近年来，基于同步相量测量技术 PMU 的 WAMS 系统应该是一种比较典型的大电网安全技术的应用探索。

### 1.1.3 高可靠性电力需求

现代化工业生产是建立在精密复杂的电子控制技术上，基于微电子、生物医学等先进技术的企业对于供电可靠性和电能质量的要求越来越高，任何电能质量的恶化均会造成负面影响和损失。许多用户需要在特定时间段供电，并且对于电能质量非常敏感，否则生产过程会受到干扰，产品质量会受到影响。这些非线性时变拓扑负荷的电力电子器件应用于工业生产、社会生活，其造成的谐波污染对电力系统安全、稳定、经济运行构成潜在的威胁，给周围电气环境带来极大影响，严重影响电能质量。同时，大容量的风电、光伏、光热、生物质等分散式发电技术的发展和运用，引起靠近用户侧的发电随机性，因此，保障电力系统能够安全可靠地接纳可再生能源发电，减少其提高可靠性及电能质量，已迫在眉睫。满足高可靠性的电力需求构成了智能电网的内在驱动力。

### 1.1.4 电力设备和资产高效利用

电网的发展与环境保护构成了一种相对平衡态势，自然资源的稀缺性特征，要求电力发展过程中必须减少对于自然资源的占用，“资源节约型，环境友好型，工业化”等变电站建设目标也就应运而生。

同时，为了提高电力设备的可用率，电力系统在设备检修模式上发生了变化，从传统的定期检修逐步转变为以可靠性为中心（Reliability Centered Maintenance, RCM）的维护，以减少低效的预防维修任务，寻求最低成本提供可靠电能。可靠性的提高一般以投资和维护费用的增加为代价，RCM 的理念就是不提高维护成本的前提下，减少供电故障率。

全生命周期管理概念的提出进一步推进了 RCM 模式的实施，智能电网的发展目标就是通过有效的技术监测手段，及时判断设备的健康状态，推进全生命周期管理的实施，支持 RCM 检修模式，提高电力设备的可用率，及资产利用率，使电网更可控、更安全。

### 1.1.5 用户参与意识

电网物理结构具有天然的垄断性特征，随着厂、网分开，电力市场进程的推进，电力用户期望获得更大的用电选择权。智能表计技术、通信网络的发展支持“信息流、电力流”的双向流动，为电网的末端用户，提供了错峰用电的选择权。

## 1.2 智能电网基本特点

智能电网将信息技术、通信技术、计算机技术和原有的输、配电基础设施高度集成而形成的新型电网，具有提高能源效率、减少对环境的影响、提高供电的安全性和可靠性、减少输电网电

能损耗的优点。应用数字技术实现电能从电源到用户的传输、分配、管理和控制，以达到节约能源和成本的新一代电力网络。如：利用先进的传感器、通信和 IT 技术，在物理的电网络之上，建立基础信息架构，将所有的设备、装置、系统、客户、员工等连接在一起。实现对数据和信息的“按需”访问、利用和智能分析，从而实现对电网企业运作的更好的管理、更自动化、更优化。

### 1.2.1 智能电网主要范畴

智能电网的组成环节：“发电、输电、变电、配电、用电、调度”，在智能电网发展过程中实现技术的特点，及彼此之间信息流、功能等关系。智能电网所涉及的范畴见图 1-2。智能电网是为了适应社会经济发展的需要而提出的新一代电网建设的构想，主要是通过将信息技术嫁接于传统电网以产生革命性的变化。

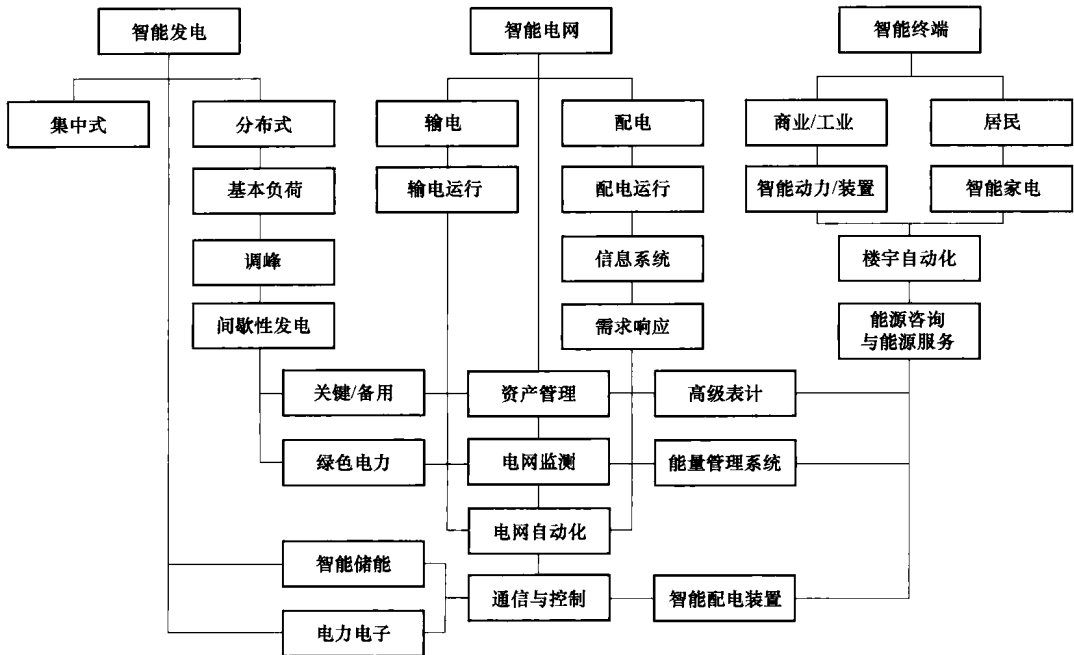


图 1-2 智能电网范畴

#### 1.2.1.1 发电

智能电网在发电方面，采用先进、高效的多元化发电技术，主要是可再生能源发电技术，如太阳能、风电、地热、潮汐、生物质发电等。鉴于可再生能源发电具有间歇性特征，在形成规模化发电后，新能源发电接入技术的运行控制、功率预测技术等方面需要有新的突破。分布式电源的发展对于机网协调，接入标准等提出了新的要求，因此，提高运行控制智能化水平，实现机组重要运行参数在线监测，确保可再生能源的有序接入，保障电力系统安全稳定运行，使可再生能源有序并网发电，实现与电力系统的协调经济运行是智能电网的重要目标之一。

#### 1.2.1.2 输电

由于环保等方面的制约，新增输电通道难度越来越大，因此，提高输变电设备的利用效率，提高现有输配电通道的可输送容量是智能电网技术发展的重点，如基于电力电子技术的灵活交流输电（Flexible Alternating Current Transmission Systems, FACTS）技术，统一潮流控

制技术 (Unified Power Flow Controller, UPFC)、超导技术, 输电线容量实时监测技术, 输电限额动态评估技术等, 以增加输电线路的容量可控性和可调节性, 进而提高电网调度的安全性、经济性。

### 1.2.1.3 变电

变电站作为智能电网的关键支撑点, 实现电力传输的转移、分配, 关键设备均集中在变电站内, 电网运行的可靠性, 很大程度上取决于变电站设备/系统的可靠性。由此, 在智能电网的体系下, 采取一、二次设备结合的技术改变变电站建设、运行模式, 建立变电站全寿命周期管理体系, 将成为一种发展的必然。

智能变电站技术体现的核心在于: ①“最大化工厂工作量, 最小化现场工作量”, 使一、二次设备的连接最大限度地在工厂完成, 有效缩短变电站建设周期; ② IEC 61850 标准的推出为变电站实现“基于间隔的信息采集, 基于全站的信息应用”, 奠定了基础, 变电站信息利用的有效性将大大提高, 有利于提高运行期间设备异常情况的判断和事故情况下的快速决策处理。

随着无人值守变电站和调控一体化技术的发展, 变电站将在智能电网“安全、稳定、经济”运行目标实施过程中承担起更重要的职责。从资产的全寿命周期安全、效能、成本角度, 建立精益化的评估体系, 建立全寿命周期综合优化管理体系, 将有利于电力用户提高资产的利用效率。

### 1.2.1.4 配电

随着分布式电源和分散式储能技术的发展, 配网的运行结构和特征将发生比较大的变化, 其对于大电网安全运行的重用也将随着分布式电源接入比重增加而提高, 电动汽车充电站, 大容量储能接入电网会影响配网的运行规律, 配电网需要各环节协调优化, 智能配电网需要提升应急系统、故障抢修、输电环节、分布式电源和用户侧等环节的协同调度机制。

配网系统可能发生的最大变化在于“微网”运行模式的引入, 微网的发展和可靠运行需要结合分布式电源和储能技术的有机协调控制。微网有两种基本运行模式, 独立运行模式和并网运行模式, 并网运行模式下需要在主网发生故障时, 快速将微网与主网断开, 通常采用固态断路器 (Solid State Breaker, SSB) 或背靠背式的 AC/DC/AC 电力电子换流器构成。因此, 微网技术的应用必须考虑大量电力电子技术采用形成的谐波, 电能质量控制将构成配网重要的应用特征。

### 1.2.1.5 用户

用户对于供电模式的选择是电力市场化运作的一种延伸, 用户的积极主动参与将有利于调整峰谷差, 平抑用电的波动, 更有效地利用电能。所涉及的主要技术是电能量测基础架构, 如智能表计技术、双向通信技术、量测数据管理技术等。

随着生活水平的提高, 家居自动化程度会越来越高, 民用电的比重随着国民经济的发展将逐步提升, 因特网技术的发展使得家居式办公成为一种趋势, 由此, 分散式自动温度控制、负荷控制技术成为用户侧智能化的重要标志。

### 1.2.1.6 调度

智能电网技术在电网调度端的体现就是在分布式一体化平台支撑的基础上, 提升: ①实时监控与预警; ②安全校核; ③调度计划; ④调度管理四大类应用, 实现同质化调度管理。建立安全防御、运行优化、高效管理“三位一体”的智能调度体系, 提升大电网调度驾驭能力, 资源优化配置能力、科学决策管理能力和灵活高效调控能力, 实现各级调度技术支持系



统有机互联互通。保障电网安全、稳定、经济、优质运行。

支撑智能调度上述功能实现的最重要前提条件就是，实现电网基础信息的“统一建模，分层处理，集成应用”，为智能调度的分析、预警、辅助决策和调整控制提供坚强的数据支撑。深化大电网运行监控、安全预警和智能决策技术，提高电网协调控制和应急处置能力；研究应用满足节能环保的优化调度计划和安全校核技术；开展大电网运行特性机理研究及智能分析；构建坚强灵活的电力通信网络，满足电网运行控制和调度管理等业务的要求。

### 1.2.2 智能电网典型特征

智能电网的典型特征体现为：“清洁、安全、自愈、经济、优质、互动”，见图 1-3。

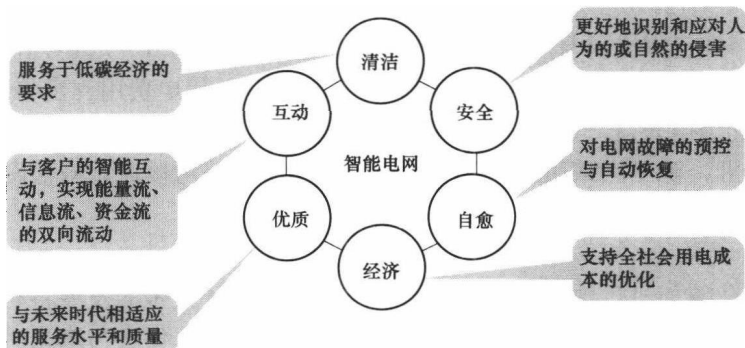


图 1-3 智能电网基本特点

#### 1.2.2.1 清洁

清洁主要体现为服务于低碳经济的要求，采用可再生能源，提高清洁能源在终端能源消费中的比重，实现减排效应。2020 年我国智能电网实现的减排效益预计情况见表 1-2 所示。

表 1-2 2020 年我国智能电网实现的减排效益预计 (万 t)

减排途径	二氧化碳减排量	二氧化硫减排量
节能带来的减排	48 483	31
替代化石能源带来的减排	83 539	54
电动汽车技术应用带来的减排	6000	
合计	138 022	85

#### 1.2.2.2 安全

主要体现为更好地识别和应对人为的或自然的侵害，在恐怖袭击、自然灾害、外力破坏和计算机攻击等不同情况下发生故障时，可以在没有或少量人工干预下，快速隔离故障，按供电的重要程度逐层自我恢复，避免类似美加“8·14”大停电事件的重演。

#### 1.2.2.3 自愈

指无需或仅需少量人为干预，实现对电网故障的预控与自动恢复，使电力网络中存在问题元器件的隔离或恢复正常运行，最小化或避免用户的供电中断。通过高速收集电网的运行信息进行连续的评估自测，检测、分析、响应甚至恢复电力元件或局部网络的异常运行。对电网的运行状态进行实时评估，采取预防性的控制手段，及时发现、快速诊断和消除故障隐