

高温超导技术 系列丛书

高温超导储能

原理与应用

High Temperature Superconducting Energy Storage Technologies:
Principle and Application

金建勋 著

 科学出版社

高温超导技术系列丛书

高温超导储能原理与应用

High Temperature Superconducting Energy Storage
Technologies: Principle and Application

金建勋 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面讲述了高温超导储能原理、技术与应用。内容主要包括:绪论、超导磁储能技术的基本原理、超导磁储能磁体技术、超导磁储能系统中的变流器技术、超导磁储能系统的应用研究,以及飞轮储能技术及其应用研究。

本书可供从事应用超导技术研究工作的科技工作者、电工与电力技术领域的人员、电力设备研制和生产行业的技术人员,以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高温超导储能原理与应用 = High Temperature Superconducting Energy Storage Technologies: Principle and Application/金建勋著. —北京:科学出版社,2011

(高温超导技术系列丛书)

ISBN 978-7-03-027875-3

I. 高… II. 金… III. 高温超导性-储能-研究 IV. ①O511②TK02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 106805 号

责任编辑:裴 育 / 责任校对:林青梅

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张: 20 1/4

印数: 1—2 500 字数: 394 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



金建勋,教授,出生于北京。1985年毕业于北京钢铁学院(现为北京科技大学)物理化学系金属物理专业。自1991年起开始从事高温超导研究,分别在澳大利亚新南威尔士大学和卧龙岗大学获得硕士学位和博士学位。自1997年起,先后作为研究员和高级研究员,在澳大利亚从事高温超导及其应用技术研究。2005年回国并继续从事应用超导与电工技术研究。曾主持过多项政府、大学及工业研究项目,在应用超导领域有大量原创性工作及多项技术发明专利,在国际学术刊物和会议上发表学术论文数百篇,并参与了大量国内外学术活动,获得多项奖励。

前 言

自高温超导现象于 1986 年被发现以来,高温超导材料、高温超导机理和高温超导应用迅速得到广泛和深入的研究。目前,超导学及超导应用技术的研究已进入了新的发展阶段,尤其是超导应用技术突破了其实际使用的经济性壁垒,使实际操作可在技术相对简单和运行成本较低条件下实现。

节能、高效、特效的技术特征和广泛的应用潜力,使高温超导技术在当今和今后强调高效、节能和环保的大背景下,展现出强劲的生命力,并已成为新世纪重点研究和发展的的高新技术。目前超导应用技术正向高温超导材料及其装置的实用化方向发展,并将是今后相当长的一个时期内,人类科学技术发展最重要的研究和应用领域之一。

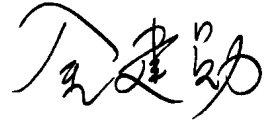
在高温超导体被发现后,高温超导电力应用技术得到了快速的发展。电力故障电流限流器、电缆、变压器等,已开始从实验研究阶段向意义重大的实用开发和实际应用方向发展。由于电力系统的迫切需要和高温超导实用化技术的发展,近年高温超导储能技术的研究与应用得到特别关注,并在理论研究和装置开发方面取得了一定的进展。高温超导储能技术具有高功率密度、高能量密度和快速充放电特性,是目前最先进的储能模式,具有良好的发展潜力,应用意义重大。高温超导体的特殊电磁特性为储能技术领域引入了一个新的发展方向,并带来特殊的效能。高温超导储能技术是今后一段时期内超导与电力技术领域的重要研究和应用发展方向之一。

一本能全面反映高温超导储能技术的专著,对于这一技术今后快速有效的发展,将具有重要的理论和实用化发展的指导意义。为了能系统介绍高温超导储能这一新技术,作者根据长期从事高温超导应用研究的经验,以及近期研究高温超导储能技术和开发储能装置的相关内容,结合多项创新工作,全面阐述了高温超导储能的概念、技术原理、应用特性及发展趋势,尤其对高温超导磁体设计、充放电原理有较清楚的描述,对高温超导储能装置技术和应用方案有较详细的总结,望能为该技术的发展起到推进作用。

本书内容以高温超导技术及其在储能装置技术中的应用为主,其中包括了作者许多实际的相关研究内容。由于本书作为新技术的前沿探索,书中难免有不妥

之处,望读者谅解并批评指正。

本书在撰写过程中,得到了学生陈孝元的积极协助,做了大量的资料整理工作;并获得信赢博士、D. Sutanto 教授、C. Grantham 教授和 C. Sorrell 教授的支持。特此感谢!



2011年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 现代电力系统的发展趋势	1
1.1.1 大型集中式供电互联电网	1
1.1.2 分布式发电系统	2
1.1.3 微型电网	4
1.1.4 智能电网	6
1.2 现代电力系统中的电能质量问题	8
1.2.1 电能质量问题	8
1.2.2 电能质量问题的解决方案	9
1.3 储能技术与现代电力系统.....	10
1.3.1 不同储能技术的特性比较.....	10
1.3.2 超导储能技术概述	12
1.3.3 超导储能技术的经济可行性分析	15
参考文献	18
第 2 章 超导磁储能技术的基本原理	23
2.1 超导磁储能的基本原理和装置结构.....	23
2.2 超导磁储能的基本理论模型.....	24
2.2.1 自然充放电基本原理	24
2.2.2 受控放电过程的稳态分析.....	29
2.2.3 受控放电过程的动态分析.....	39
2.2.4 超导磁储能理论模型的建立	40
2.3 基于谐振充电技术的超导磁储能模型及其应用.....	42
2.3.1 直接充电技术的缺陷分析.....	42
2.3.2 谐振充电技术的可行性分析	43
2.3.3 一种实用的谐振充电电路方案探讨	48
2.4 其他超导磁储能模型简介.....	52
2.4.1 基于 Z 源变流器技术的超导磁储能模型	52
2.4.2 基于电磁感应技术的磁通泵充电模型	55
2.4.3 基于集中参数网络模型的超导线圈建模	59
参考文献	64
第 3 章 超导磁储能磁体技术	68
3.1 超导线材特性及其发展状况.....	68

3.1.1	低温超导材料	68
3.1.2	高温超导材料	69
3.1.3	二硼化镁超导材料	76
3.2	超导磁体设计与优化	77
3.2.1	超导磁体的设计要求及计算	77
3.2.2	超导磁体设计与优化方法	82
3.2.3	超导磁体设计与优化实例分析	89
3.3	超导磁体装置的关键技术	97
3.3.1	低温制冷	97
3.3.2	超导开关	102
3.3.3	电流引线	106
3.3.4	失超检测与保护	112
3.3.5	绝缘	117
3.4	超导磁储能磁体装置的实验测试及分析	119
3.4.1	制冷系统的性能测试及分析	119
3.4.2	磁体绝缘安全测试及分析	133
3.4.3	磁体系统整体性能测试及分析	138
3.5	超导磁储能磁体装置发展概况	144
3.5.1	超导磁储能磁体装置总结	144
3.5.2	超导磁储能实际装置举例	147
	参考文献	154
第4章	超导磁储能系统中的变流器技术	162
4.1	超导磁储能用变流器的发展概述	162
4.2	超导磁储能用变流器的拓扑结构及性能比较	163
4.2.1	电压源变流器	163
4.2.2	电流源变流器	170
4.2.3	电压源和电流源变流器的性能比较	173
4.2.4	电压源和电流源变流器的仿真实例分析	175
4.3	超导磁储能用变流器的控制技术	179
4.3.1	基于阶梯波的 PWM 技术	179
4.3.2	基于载波组的 PWM 技术	180
4.3.3	多电平电压 SVM 技术	181
4.3.4	移相式 SPWM 技术	181
4.3.5	非线性控制技术	184
4.3.6	变流器控制技术的性能比较	187
	参考文献	188
第5章	超导磁储能系统的应用研究	193
5.1	柔性交流传输系统应用	193
5.1.1	应用需求分析及应用方案	193

5.1.2 静止同步补偿器应用及实例分析	196
5.1.3 静止同步串联补偿器应用及实例分析	200
5.1.4 统一潮流控制器应用及实例分析	202
5.2 分布式发电系统应用	205
5.2.1 应用需求分析及应用方案	205
5.2.2 光伏发电系统应用及实例分析	206
5.2.3 风力发电系统应用及实例分析	209
5.2.4 水力发电系统应用及实例分析	213
5.3 微电网系统应用	216
5.3.1 应用需求分析及应用方案	216
5.3.2 应用实例分析	217
5.4 不间断电源系统应用	223
5.4.1 应用需求分析及应用方案	223
5.4.2 应用实例分析	226
5.5 混合能源系统应用	228
5.5.1 应用需求分析及应用方案	228
5.5.2 应用实例分析	229
5.6 功能复合与特殊应用	238
5.6.1 超导限流-储能装置复合应用	238
5.6.2 多功能应用	238
5.6.3 电流控制器应用	239
5.6.4 电力系统状态诊断应用	240
5.7 智能电网系统综合应用探讨	241
参考文献	243
第6章 飞轮储能技术及其应用研究	246
6.1 飞轮储能系统的基本原理与装置结构	246
6.2 飞轮储能关键技术研究	248
6.2.1 飞轮转子储能的原理及优化设计	248
6.2.2 轴承系统的不同结构特性分析	253
6.2.3 飞轮电机及功率变换装置	267
6.3 超导块材磁悬浮技术	271
6.3.1 超导块材磁悬浮的基本原理与结构	271
6.3.2 超导块材磁悬浮实验和理论研究发展概况	278
6.3.3 超导块材磁悬浮实验测试及理论分析	283
6.4 飞轮储能技术的应用和发展	295
6.4.1 飞轮储能技术的应用概况	295
6.4.2 大型超导飞轮储能装置实例	296
6.4.3 飞轮储能技术的应用展望	306
参考文献	306

第 1 章 绪 论

1.1 现代电力系统的发展趋势

1.1.1 大型集中式供电互联电网

在世界经济快速发展和不断融合的过程中,为了适应经济的快速增长所带来的用电需求的增加,全球主要国家和地区的电力系统目前大都朝着大容量、大规模、高电压、远距离的技术方向发展。现代电力系统是历史上逐渐扩建发展起来的地域辽阔、结构复杂的大系统,目前电力系统已经成为人类历史上最庞大和复杂的系统^[1]。

为了满足电能在容量、质量、安全性和经济效益等方面的要求,保证社会生产和人民生活的需要,客观上要求现代电力系统用智能的高压电网将众多发电厂和用电区域连接成为一个整体的电力系统,以便向电力用户提供充足、安全、经济且有一定质量保证的电能供用。目前,世界上大部分电力系统已发展成为以火电、水电及核电为主的集中式发电和远距离超高压输电的大型互连网络系统。其直接表现是区域电网规模的不断增大,并且通过区域电网间的互联,形成地区联网、全国联网、跨国联网,以及更大规模的联合电网,从而实现充足、可靠、优质、经济的供电。例如,欧洲地区的五大互联电网,即西欧电网(UCPTE)、东欧和俄罗斯电网(UPS)、中欧电网(IPS)、中部系统(CENTRAL)和北欧斯堪的纳维亚国家互联电网(NORDEL);北美地区覆盖美国、加拿大和墨西哥的北美联合电力系统。在我国,近年来电力工业正在迅猛地发展,在建成的六个跨省区大电网的基础上,国家计划以三峡水电站为基础,建立起全国互联电网的框架,以促进全国统一电网的建设,实现西电东送、南北互供、全国联网。

但是,大型互联电网规模的不断扩大,使得输电网的结构和运行日益复杂,造成已有输电系统的负担日益加重。同时,随着配电网用电负荷的不断增加,受端电网对外来电力的依赖程度也不断提高,使电网运行的稳定性和安全性下降。大型互联电网已难以适应用户越来越高的安全和可靠性要求,以及多样化的供电需求。各种电力系统问题将造成大量的电能损耗或被迫降低电网的输送能力,严重的情况下甚至会造成电力系统的灾变。

近几十年来,世界各地的大型互联电网相继发生多起系统失稳或崩溃事故。

1978年12月19日,法国电网发生电压崩溃事故,造成全网75%的负荷停电,停电时间最长达8小时。1987年7月23日,日本东京电网发生电压崩溃事故,有8168MW的负荷停电,停电时间最长达3小时21分。1996年7月2日和8月10日,美国西部电网两次发生电压崩溃事故。2003年8月14日,发生的大停电波及美国的8个州和加拿大局部地区,经济损失达60多亿美元。2005年8月18日,印度尼西亚境内发生大面积停电,波及近1亿人口。

在我国,因电网故障或自然灾害而导致的局部地区停电事故时有发生,使大量用户供电中断,造成巨大的经济损失。典型的实例如2008年年初冰雪灾害天气带来的南方部分省区电网大范围停电事故^[2~4]。全国共有14个省级(含直辖市)电网、约570个县的用户供电受到不同程度的影响,部分地区电力设施损坏极其严重。这次雪灾对电力系统影响如此严重,除了目前大量电力设备无法承载罕见的雨淞、覆冰带来的巨大重压的原因之外,也暴露了我国电力系统的电网结构、布局等方面存在的缺陷。由于大型发电厂和负荷中心距离较远,远距离输配电比例大,而多条大型省间交直流远距离高压输电通道因雪灾而中断,主要依靠外来远距离大容量送电通道的省、区在此次雪灾中就陷入了大范围、长时间的停电状态^[5,6]。

现代集中式发电互联电网具有大容量、大规模、高电压、远距离的特点,可以基本满足人们对电能的需求。但是,鉴于在世界范围内发生的多起停电事故所暴露的大型集中式发电互联电网的脆弱性问题,如输电系统的负担日益加重、配电系统的稳定性和安全性日益下降等,人们不禁要考虑,未来的电力系统应该采取什么样的发展模式,一味地扩大电网规模显然不能满足实际要求。20世纪80年代末,发达国家(如日本、美国),甚至包括一些发展中国家,开始研究并应用多种一次能源形式结合的高效、经济的新型电力技术——分布式发电技术(distributed generation, DG)^[7~10]。由于集中发电的问题,以及近年可再生能源发电技术的实用化发展,当今电力工业出现了一个由传统的集中供电模式向集中和分散相结合的供电模式过渡的趋势。

1.1.2 分布式发电系统

分布式发电也称为分散式发电或分布式供能。关于分布式发电尚无统一的定义,涉足于该领域的制造商、电力零售商及用户对分布式发电有不同的诠释。一种典型的分布式发电定义为:任何靠近负荷的发电方式都称为分布式发电。这种定义不仅包含了采用再生能源的发电机组,也涵盖了任何位于负荷侧的采用常规能源的发电机组。它包括:安装于重要负荷的备用柴油发电机组;根据用户对供电可靠性的要求,安装于负荷中心的小型发电机组;安装于变电站,用于提供无功支持及改善电能质量的同步调相机等。国外某些电力系统对分布式发电的规模有进一

步的限制,将靠近负荷中心且装机容量少于 $N\text{kW}$ (或 MW)的发电设备称为分布式发电系统, N 的具体数值依不同的电力系统而异,一般构成容量范围是 $10\text{kW}\sim 50\text{MW}$ 。

相对于大型集中式发电系统而言,分布式发电系统具有电源容量小、电压等级低、小型模块化、接近负荷中心、运行方式灵活等特点。而这些特点也恰恰使分布式发电系统弥补了超高压、远距离输电的不足,满足了电力系统和用户的特定要求,如电力调峰、为边远用户或商业区供电等,成为现代电力电网规划的新课题。

分布式发电系统自身的特点决定了它不是采用煤炭作为一次能源,而是大量采用环境友善的可再生能源(renewable energy, RE)^[11,12]。目前,分布式发电技术与新型可再生能源技术的发展密切相关,主要包括:太阳能发电技术、风力发电技术、燃料电池、微型燃气轮机等。

(1) 太阳能发电技术:可分成太阳热能发电和太阳光电发电两类。太阳热能发电是通过聚集太阳能,将某种工质加热,直接或间接地产生蒸汽,驱动汽轮发电机产生电能;太阳光电发电即光伏发电,是利用光生伏特效应,将光能直接转化成电能。太阳光电发电是太阳能发电的主要形式。按与电力系统的关系分类,光伏发电系统可分为独立光伏发电系统和并网光伏发电系统。

(2) 风力发电技术:风能是一种广义的太阳能,也是一种巨大的可再生能源。风力发电主要有两种利用方式:一是作为独立供电系统,或将风力发电机与柴油发电机或太阳能电池组成混合供电系统,向偏远地区、城镇社区、重要负载等供电;二是将多台风力发电机组并列运行,形成大型风力发电场(wind farm, WF),也称风力田,直接与大型输配电网级联并网。

(3) 燃料电池:是一种将储存在燃料和氧化剂中的化学能直接转化为电能的装置,具有燃料利用率高、燃料选取广泛、功率密度大、环保无污染、容量可根据需要而定等多种优点,可以作为并网发电装置与后备电源。与太阳能、风能、水能等可再生能源相比,由于燃料电池不受地域等因素的限制,更适应于一些特定场合及保证关键负荷的运行。

(4) 微型燃气轮机:是一种功率范围在 $25\sim 75\text{kW}$ 的小型发电机组,可以使用天然气、丙烷、煤矿瓦斯等多种燃料为一次能源。为了提高燃料的利用效率,微型燃气轮机除了为用户供电外,还往往同时为用户供热,构成“热电并用系统”。与分布式发电系统中其他分布式电源相比,微型燃气轮机的输出功率比风力发电与光伏发电的输出功率平稳,而其成本远低于燃料电池,具有较好的应用前景。

以上四种主要分布式发电技术的工程造价和特点如表 1.1-1 所示。

表 1.1-1 分布式发电技术的工程造价及特点

造价及特点	太阳能电池	风力发电机	燃料电池	微型燃气轮机
功率范围/kW	1~100	50~2000	5~2000	30~75
工程造价/(\$/kW)	1500~6500	1000~1500	3000~4000	1000~1500
发电成本/(\$/kW·h)	15~20	5.5~15	10~15	7.5~10
环境影响	无污染	无废气排放、存在噪声和景观影响	无污染	有废气排放、较常规发电机组污染轻
输出功率特点	功率不平稳、功率密度低	功率不平稳	功率平稳	功率平稳、易调节

目前,风力发电、光伏发电已经作为独立电源或混合电源为一些偏远地区、城镇社区供电,并取得了较好的实际效果,可望节约电网建设费用,满足用电负荷快速增长的需要。但是,相对独立的分布式电源供电系统,与大电网的联系较弱,其供电的经济性、可靠性完全取决于分布式电源,这就要求分布式电源要尽可能降低成本,使其在经济性上优越于电网扩张,并利用先进的电力电子控制技术,保证输出电能质量(power quality, PQ),满足电力用户的用电要求。

除了利用分布式发电系统形成独立供电系统之外,在大型的输、配电网中引入分布式电源来改善电能质量,形成智能分布式的输、配电网系统将是未来分布式发电系统的主要应用发展方向。分布式电源在配电网中的应用主要包括:改善配电网的电能质量和为重要负荷提供备用电源两个方面。现有的配电网系统存在有功与无功储备不足等问题,采用太阳能电池、燃料电池这类带有储能特性的分布式电源,或采用可再生能源与储能装置相结合的运行方式是提高供电可靠性及电能质量的有效措施。在输电网系统中,分布式电源可采用电力电子装置控制,与柔性交流输电设备相配合,形成灵活输电系统。虽然目前分布式电源的成本与技术还不能满足在输电网中大规模应用的条件,但随着分布式发电技术的进一步完善以及电力电子技术的进步,分布式电源将在柔性交流输电系统中发挥重要作用。

1.1.3 微型电网

分布式电源尽管优点突出,但本身存在诸多问题,如分布式电源接入成本高、控制困难等。另外,分布式电源相对大电网来说是一个不可控源,因此大型电网系统往往采取限制、隔离的方式来处置分布式电源,以减小其对电网的冲击。IEEE P1947 对分布式电源的人网标准做了规定,当电力系统发生故障时,分布式电源必须马上退出运行,这就大大限制了分布式电源效能的充分发挥。为协调大电网与分布式电源间的矛盾,充分挖掘分布式电源为电网和用户所带来的价值和效益,20世纪90年代以来,国外众多专家学者提出了一种将分布式发电技术与储能技术综合在一起的特殊电网形式,即微型电网(micro grid, MG)^[13~16]。

国际上对微型电网的定义不尽相同,但各种定义方案均认为:微型电网应该是由各种微能源(风力发电、光伏发电、燃料电池、微型燃气轮机等)、储能装置(蓄电池、超导磁储能、超级电容器、飞轮储能等)、负荷以及控制保护系统组成的集合;电源系统容量一般为 kW~MW 级别;通常接在低压或中压配电网中;具有并网运行和独立运行能力,能够实现即插即用和无缝切换。

美国电力可靠性技术解决方案协会(CERTS)最早提出了微型电网的概念,并且是众多微型电网概念中最权威的一个。图 1.1-1 是该协会提出的微型电网基本结构^[17],图中展示了光伏发电、微型燃气轮机和燃料电池等微电源形式,其中一些接在热力用户附近,为当地提供热源。微型电网结构包括 3 条电源馈线和 1 条负荷母线,电源馈线通过主分隔装置与配电系统相连,可实现孤网运行与并网运行模式间的平滑切换。同时,微型电网中配置有对整个微型电网综合分析控制的能量管理器和对微电源就地控制的潮流控制器。当负荷变化时,潮流控制器根据本地电力系统信息进行潮流调节,当地的微电源相应增加或减少其功率输出以保持功率平衡。

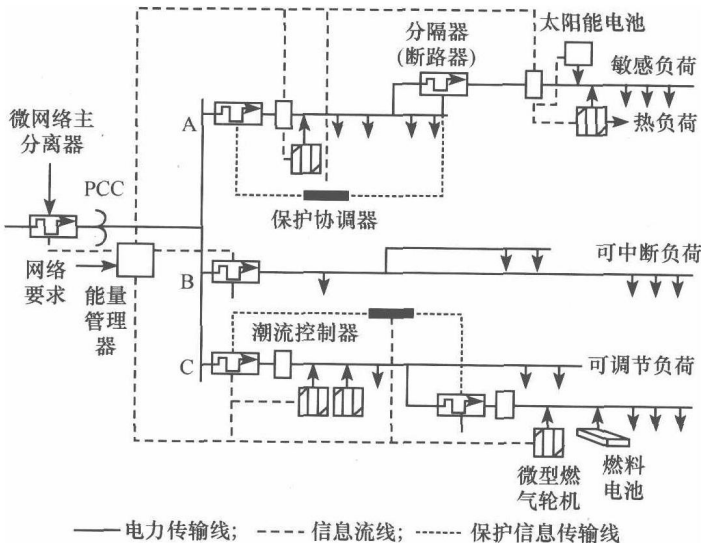


图 1.1-1 微型电网的基本结构图

微型电网从系统观点看问题,紧紧围绕全系统能量需求的设计理念 and 向用户提供多样化电能质量的供电理念,将发电机、负荷、储能装置及控制装置等结合,形成一个单一可控的单元。微型电网接在用户侧,具有低成本、低电压、低污染等特点,既可与大电网联网运行,也可在电网故障或需要时与主网断开单独运行,因此微型电网可视为现代电力系统可控的“细胞”,其灵活的可调度性可适时向大电网

的稳定、可靠供电提供有力支撑。在接入问题上,微型电网的入网标准只针对微型电网与大电网的公共连接点(PCC),而不针对各个具体的微电源。微型电网不仅解决了分布式电源的大规模接入问题,充分发挥了分布式电源的各项优势,还进一步保障了电力用户的供电稳定性和可靠性,带来了多方面的效益。

因此,微型电网虽然也是分散供电形式,但它不是分布式发电技术发展初期的孤立系统,而是采用了大量先进的现代电力技术,与集中供电的大型互联电网构成有机统一的供电系统,其智能性与灵活性远在原始孤立的分布式发电系统之上。目前,美国、日本、欧洲等国家和地区已对微型电网进行比较深入的研究^[14~16],并取得了一系列的理论研究和实际装置成果,国内众多研究单位也相继开始了对微型电网的相关研究^[18~20],但仍处于理论探索阶段。

1.1.4 智能电网

当前,节能减排、绿色能源、可持续发展成为世界各国关注的热点。人类能源发展面临的第一挑战,是以可再生能源逐步替代化石能源、建造能源使用的创新体系,以信息技术彻底改造现有的能源利用体系,最大限度地开发电网体系的能源效率。因此,人们期望通过一个数字化信息网络系统将能源资源开发、输送、存储、转换(发电)、输电、配电、供电、售电、服务,以及蓄能与能源终端用户的各种电气设备和其他用能设施连接在一起,通过智能化控制实现精确供能、对应供能、互助供能和互补供能,将能源利用效率和能源供应安全提高到全新的水平,将污染与温室气体排放降低到环境可以接受的程度,使用户成本和投资效益达到一种合理的状态。这就是智能电网(smart grid, SG)的思想^[21~25]。

所谓智能电网,就是电网的智能化,也被称为“电网 2.0”。智能电网是建立在集成的、高速双向通信网络的基础上,通过先进的传感和测量技术、先进的设备技术、先进的控制方法,以及先进的决策支持系统技术的应用,实现电网的可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全的目标。其主要特征包括自愈、用户激励与互动、抵御攻击、提供满足用户需求的高质量电能、容许各种不同发电形式的接入、易于电力市场及资产的优化高效运行。智能电网的核心内涵是实现电网的信息化、数字化、自动化和互动化,也被称为坚强的智能电网(strong smart grid)。智能局域网电网的简单结构示意图如图 1.1-2 所示^[26~28]。

智能电网概念发展的三个里程碑如下^[29~31]:

第一个是 2006 年美国 IBM 公司与全球电力专业研究机构、电力企业合作开发了智能电网解决方案。这一方案被形象比喻为电力系统的“中枢神经系统”,可看做智能电网最完整的一个解决方案,标志着智能电网概念的正式诞生。

第二个是奥巴马上任后提出的能源计划,拟全面推进分布式智能能源管理,建立美国横跨四个时区的统一智能电网系统。

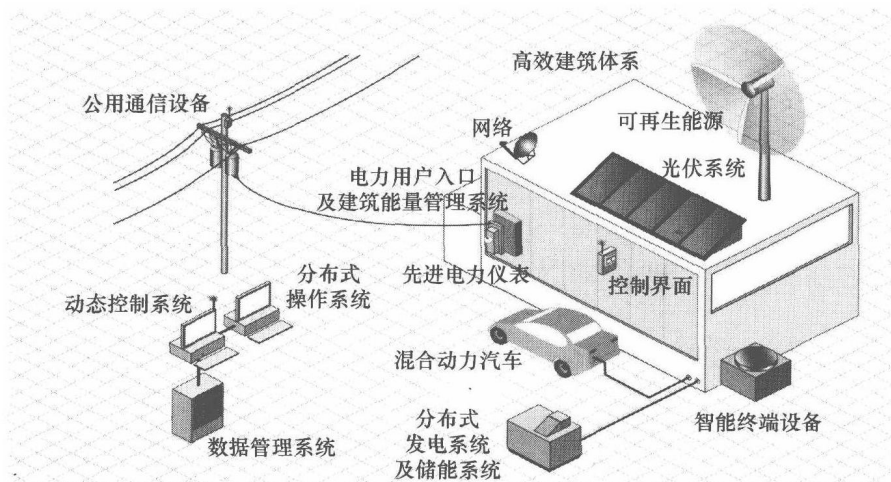


图 1.1-2 智能局域电网的简单结构示意图

第三个是 2009 年中国能源专家提出的“互动电网”^[32]。“互动电网”是指在创建开放的系统和建立共享的信息模式的基础上，以智能电网技术为基础，通过电子终端将用户之间、用户和电网公司之间形成网络互动和即时连接，实现数据读取的实时、高速、双向的总体效果，实现电力、电信、电视、远程家电控制和电池集成充电等的多用途多功能化。

随着我国特高压电网的建设和电力体制改革的不断深化，智能电网也将成为我国电网发展的一个新方向。在宏观政策层面，电力行业需要满足建设资源节约型和环境友好型社会的要求；在市场化改革层面，电能交易手段与定价方式正在改变，市场供需双方的互动将越来越频繁，电网必须能够灵活地支持各种电能交易。

根据专家提议，我国可将智能电网提升到建设智能电力系统的高度并将其纳入国家能源战略规划、“十二五”规划和国家重大科技项目计划。一是可全方位推动水电、核电、风能及太阳能等可再生和清洁能源开发利用，优化能源结构与布局，提高清洁能源比重；二是通过实现电力企业与电力用户的双向互动，可实现有效的需求侧响应，提高电能终端使用效率，促进用电侧节能；三是可以增加发电机组和输变电设施的利用小时数，降低火电机组发电煤耗，促进发电侧节能；四是推动其他前沿相关技术的进步，如新型输电技术、分布式能源技术、蓄能技术、电动汽车、智能家用电器等新技术的推广应用。

由于各个国家能源和用户分布以及电网情况各不相同，各国对智能电网的认识和理解并不统一，但利用现代信息技术、控制技术实现电网的智能化已成为普遍的共识。我国与欧美等发达国家和地区不同，国外智能电网研究更多地关

注配电领域,而我国的首要任务是满足不断增长的电能需求,需要更多地关注智能输电网领域,结合特高压电网的建设和发展,提升驾驭大电网安全运行的能力,保证电网的安全可靠和稳定运行。同时,需进一步统筹输电网发展和配电网信息化建设等工作,提出我国智能电网的发展规划,逐步建成具有中国特色的智能电网。

1.2 现代电力系统中的电能质量问题

1.2.1 电能质量问题

伴随着微型电网和智能电网概念的兴起,现代电力系统正朝着综合化、智能化、一体化的方向发展,逐渐形成集中和分散相结合的综合供电模式,构建资源节约型、环境友好型电网。从电力市场的角度出发,完善现代电力系统的最终目的就是最大限度地满足电力用户不断提高的电能质量要求。

电能质量问题可定义为:任何电能质量问题表现为电压、电流、频率的偏差,导致电力用户设备的损坏或不正常的工作^[33]。现代电力系统中的电能质量问题主要包括^[34,35]:电压跌落(voltage sag/dip)、电压上升(voltage swells/surge)、过电压(over-voltage)、欠电压(under-voltage)、电压缺口(notching)、电压波动或闪变(voltage fluctuations/flicker)、电压不平衡(voltage imbalance)、中断(interruptions)、脉冲式瞬变(impulsive transient)、重复性脉冲式瞬变(repetitive impulsive transient)、振荡式瞬变(oscillatory transient)、噪声(noise)、谐波(harmonics)、间谐波(inter-harmonics)、直流偏移(DC offset)、电源频率变化(power frequency variations)等。

图 1.2-1 给出了上述一些电能质量问题的图示^[36]。

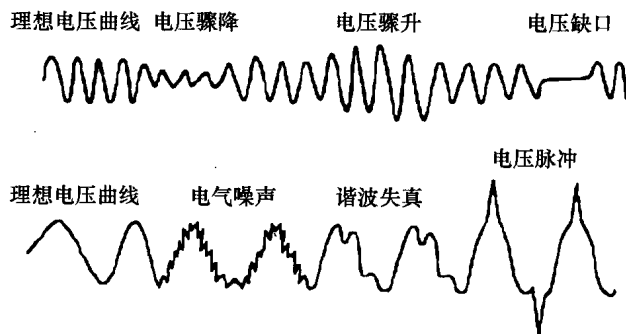


图 1.2-1 部分电能质量问题的图示

电能质量问题所带来的危害是主要包括^[36]: