

供用电企业实用节电技术丛书

# 变压器能效 与节电技术

中国电力企业联合会科技服务中心 组编  
胡景生 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



供用电企业实用节电技术丛书

# 变压器能效与节电技术

中国电力企业联合会科技服务中心 组编

胡景生 主编



机械工业出版社

本书共 14 章。从变压器标准的沿革, 供用电系统的分类与发展, 变压器经济运行的理论基础, 输、配电网中变压器的经济运行, 变压器负载经济调配, 变压器电压优化调整的节电降耗, 变压器经济运行管理系统及变压器损耗的动态计算等方面, 全面系统地介绍了变压器经济运行节电技术, 并从节能角度给出了变压器更新时的科学方法。

本书内容全面系统, 并有大量的案例帮助读者理解和掌握这些降低变压器损耗的方法。本书实用性强, 可供发、供、用电企业相关技术人员及高等院校师生参考阅读。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

变压器能效与节电技术/胡景生主编. —北京: 机械工业出版社, 2007. 5

(供用电企业实用节电技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 111 - 21435 - 9

I. 变… II. 胡… III. 变压器 - 用电管理 - 节能 IV. TM4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 063828 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 赵玲丽 版式设计: 张世琴 责任校对: 程俊巧  
姚培新

封面设计: 陈沛 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2007 年 6 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 27.25 印张 · 674 千字

0 001—5 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 21435 - 9

定价: 50.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

## 丛书编辑委员会

主任委员：鲁俊岭  
副主任委员：王益民 唐斯庆 徐继法 孔祥国 吕长江  
付贵祥 师文林  
委员：邱野 吴加新 冯立彬 吕家滨 秦文杰  
孟凡中 郑保义 武卷英 李信伟 周伟

## 本书编写人员

主编：胡景生  
参编：郭云高 漆铭钧 袁静帆 胡国元 董志恒  
张冬然 裴家腾 冯龙喜

## 丛 书 序

“建设节约型社会，实现可持续发展”已经被明确为我国的基本国策。资源与环境的双重压力，迫切要求各领域（尤其是产能和耗能单位）落实国家既定的发展目标。随着一次能源转换为电能的比重、电能占终端能源消费量的比重不断提高以及电力行业固有的资源密集型、资金密集型的特点，使电力行业成为我国环境资源工作的关键所在，建设节约型电力企业的重任摆在了所有电力工作者面前。

电力工业是技术密集型工业，专业性强，能量的转化和传输是一个关联性强、比较复杂的系统，节能工作实施的效果往往不能通过单独的一个环节来认定，也不能片面强调节约而忽略安全。电力企业在某些节能工作方面的谨慎态度以及前些年误把窃电、电量转移、牺牲电能质量的做法当成节约就说明了推动电力行业节能工作的艰巨性和复杂性。因此电力行业节能工作应该遵循科学、系统、实践、推广的规律，既不能畏难不前，也不能求快冒进。

为有效地配合电力企业推进节能工作的开展，发挥电力行业技术服务部门的作用，中国电力企业联合会科技服务中心在认真分析了电力企业节能工作特点的基础上，有针对性地组织编写了供用电企业实用节电技术丛书。丛书突出强调三个方面：

(1) 实用性：强调应用、借鉴和参考价值。以电力企业生产过程中涉及到的能量转化原理、能量传输过程为理论基础，以存在的节电环节统计分析为展开线索，以节电手段为落脚点的三重结构。

(2) 开放性：强调积聚全行业的智慧和经验。丛书的编写不局限于某几个人的思路，面向全行业所有相关人员开放，长期向电力行业开展电力节能案例征集工作。

(3) 长期性：强调在继承总结的基础上，与时俱进地跟踪反映电力节能技术的发展。随着认识水平的提升、技术的进步，会产生很多新的、实用的节能措施和手段，有些已有节能措施可能不再是最佳选择，丛书将根据电力行业节能技术的进展情况实时再版；相信在大家的关注和支持下，随着时间的推移、认识的加深、经验的累积，丛书一定会为促进电力企业的节能工作发挥积极的作用。

供用电企业实用节电技术丛书围绕影响供用电系统节电工作的三个重点展开，即变压器能效与节电技术、电网无功功率补偿与降损、电动机能效与节电技术。丛书在遵循上述编写特点的基础上，牢牢把握电力是二次能源、生产与消费必须同时完成、具有网络性（系统性）的特点（这种特点使节电效果的考核工作相对困难），强调节电技术和手段的效果必须能够经得起各个方面的考核，注重从理论分析和实际应用的角度客观评价节电措施的实施情况，既强调从节电的角度完善相关理论，也强调节电手段和技术的现场可操作性。

本丛书由《变压器能效与节电技术》、《电网无功功率补偿与降损》、《电动机能效与节电技术》三部分组成。

丛书的编写得到了国家电网公司、中国南方电网公司、中国石油天然气集团公司、中国石油化工股份有限公司、中国铝业公司等单位的指导和大力支持，我们在此表示衷心的感谢！

由于我们的水平有限，又加上电力节能技术是一个围绕实践、应用发展起来的跨专业、跨学科的技术汇总，疏漏、错误在所难免，敬请广大读者批评指正！

**丛书编委会**

# 前 言

我国虽然是能源资源大国，但也是个能源消费大国。按人均资源占有率不及世界平均水平一半，所以也是个能源短缺大国，同时又是能源管理水平落后大国。由于我国的能源运转系统中科技含量太低，因此从能源开发、运输、加工到用能终端效率都很低。据调查研究表明，开采效率为 33.5%，加工运输效率为 67.8%，终端利用效率为 33.4%，总效率为 11.2%。有 88.8% 的能源没有得到合理利用，全部损失掉。我国主要产品能源单耗比国际先进水平要高 30%~80%，其能源利用效率不仅远远落后于发达国家水平，甚至比一些发展中国家都低。

电力是一种使用便捷的优质二次能源，当今世界能源的发展是以电力为中心，我国从 1997 年开始全年的发电量与用电量均居世界第二位（仅次于美国），但人均用电量却居世界第 86 位，仅为世界人均用电量的 1/3。

我国的国民经济正处于高速发展阶段，对电力需求快速增长，用电量平均增长率超过国民经济增长率，缺电成为国民经济发展的“瓶颈”。同时，电能生产过程中伴随二氧化碳、二氧化硫等气体排放，对环境造成很大影响，节约用电是解决电力需求增长与环境污染严重矛盾问题的有效措施。

变压器在整个国计民生中是一种应用极为广泛的电气设备。一般来说，从发电到供电一直到用电需要经过 3~5 次的变压过程，变压器自身要产生有功功率损耗与无功功率消耗。由于变压器总台数多，总容量大，所以在广义电力系统（包括发、供、用电）运行中，变压器总的电能损耗约占发电量 10% 左右。这对全国来说，意味着全年总的电能损耗为 2500 多亿 kW·h，相当三个中等省的用电量之和，变压器经济运行就是在损耗的 2500 多亿 kW·h 电能中去挖掘节电潜力。

变压器经济运行是在确保变压器安全优质运行及满足供电量的基础上，充分利用电网中现有变压器，发挥物尽其用功能，通过优选变压器经济运行方式，对负载实施经济调度，从而最大限度降低变压器的有功功率损耗和无功功率消耗；对改扩建的变电所（站），发挥财尽其效功能，充分利用改扩建资金，应用变压器经济运行科学理论，从而构建成“安全、优质、经济型变电所（站）”，为降低变压器损耗奠定良好基础。

变压器经济运行节电技术是“八五”期间全国重点推广的新技术，并发布为国家标准，因此曾在全国范围推广和应用，已在部分发、供、用电企业取得明显节电效果。2006 年，国家对变压器经济运行的国家标准进行重新修订，新的标准正在起草中。

本书全面系统地介绍了变压器经济运行节电技术，为读者提供了降低变压器损耗的科学理论及其节电案例。这项技术在发、供、用电企业的有效实施，既能为发、供、用电企业节约大量的电能，创造显著的经济效益，同时又为社会大量节约发电的投资，节约资源、改善环保，是利在当代，功在千秋的大业。

由于作者水平所限，本书难免存在着缺点和错误之处，敬请广大读者批评指正。

# 目 录

## 丛书序

## 前言

## 第1章 变压器产品标准的沿革及提高 技术经济指标的节能过程

简介..... 1

## 第2章 供用电系统经济运行综述..... 4

- 2.1 供用电系统的分类与发展..... 4
- 2.2 供用电系统经济运行的内涵与特点..... 8
- 2.3 电能节约与环境保护..... 12
- 2.4 供用电系统经济运行与电力需求侧管理..... 16

## 第3章 变压器节电技术的理论基础..... 19

- 3.1 变压器的工作原理与分类..... 19
- 3.2 变压器的技术参数..... 21
- 3.3 双绕组变压器的功率损耗..... 25
- 3.4 三绕组变压器的功率损耗..... 30
- 3.5 电力线路的技术参数与功率损耗..... 34

## 第4章 双绕组变压器的经济运行..... 40

- 4.1 对供用电系统变压器经济运行误区的剖析..... 40
- 4.2 双绕组变压器间技术特性优劣的判定..... 44
- 4.3 变压器并列运行条件与安全运行..... 53
- 4.4 双绕组变压器并联运行的经济运行方式..... 60
- 4.5 双绕组变压器分列运行的经济运行方式..... 76
- 4.6 双绕组变压器经济负载系数与经济运行区..... 85
- 4.7 双绕组变压器“大马拉小车”的科学判定..... 94

## 第5章 三绕组变压器的经济运行..... 100

- 5.1 三绕组变压器功率损耗的工程计算式..... 100
- 5.2 三绕组变压器间技术特性优劣的判定..... 104

5.3 并列运行三绕组变压器的经济运行方式..... 116

5.4 三绕组变压器的经济负载系数..... 129

5.5 三绕组变压器的经济运行区间..... 138

5.6 三台三绕组变压器并列与分列的经济运行..... 148

5.7 走出三绕组变压器经济运行误区的节电案例..... 154

## 第6章 配电(电厂)变压器经济运行..... 157

- 6.1 配电变压器经济运行节电潜力的分析..... 157
- 6.2 增设小容量变压器的经济运行..... 158
- 6.3 不等容量变压器的经济运行..... 162
- 6.4 单相变压器的经济运行..... 164
- 6.5 电炉变压器的经济运行..... 167
- 6.6 变电所(站)的自用变压器的经济运行..... 170
- 6.7 配电所负载侧有备用电源的经济运行方式..... 171
- 6.8 负载由双电源供电配电所的经济运行方式..... 177

## 第7章 整流变压器的经济运行..... 184

- 7.1 大功率硅整流机组的能耗参数..... 184
- 7.2 大功率硅整流机组的有功损耗与经济负载系数..... 189
- 7.3 大功率硅整流机组的无功消耗与经济负载系数..... 195
- 7.4 大功率硅整流机组的结构优化..... 200
- 7.5 大功率硅整流机组间技术特性优劣的判定..... 204
- 7.6 大功率硅整流机组并列运行的负载分配与功率损耗..... 206
- 7.7 大功率硅整流机组的经济运行方式..... 214
- 7.8 直流供电线路的合理化..... 218

## 第8章 变压器负载经济调配..... 221



8.1 变压器提高负荷率的节电降耗 .....	221	11.5 对并列运行变压器台数的优化 选择 .....	347
8.2 变压器削峰填谷的节电降耗 .....	231	<b>第12章 变压器损耗的动态计算及 系统节电</b> .....	352
8.3 变压器间负载经济分配 .....	241	12.1 负载形状系数 .....	353
8.4 调整相间不平衡负载的节电降耗 .....	254	12.2 负载波动损耗系数的理论分析 .....	354
8.5 变电所间负载经济调度 .....	262	12.3 负载波动损耗系数的验证报告 .....	364
8.6 变电站间负载经济调度 .....	266	12.4 变压器(电力线路)连接系统节电 的计算 .....	368
<b>第9章 变压器供电线路经济运行</b> .....	272	12.5 变压器经济运行节电的计量 .....	372
9.1 双回专用供电线路经济运行 .....	272	<b>第13章 变压器更新的节电潜力与经济 效益</b> .....	377
9.2 两端供电网开式经济运行方式 .....	278	13.1 加速老旧变压器的更新换代 .....	377
9.3 环状供电网的经济运行 .....	285	13.2 贯彻配电变压器能效标准的 节电降耗 .....	381
9.4 闭式供电网的经济运行 .....	289	13.3 实施变压器安全优质经济 运行 .....	387
<b>第10章 变压器电压优化调整的节电 降耗</b> .....	300	13.4 老旧变压器更新的节电潜力与 社会效益 .....	397
10.1 并联电容器无功功率补偿的 节电降耗 .....	300	<b>第14章 优选节能型变压器经济容量与 台数</b> .....	403
10.2 双绕组变压器并联补偿电容器的 节电降耗 .....	305	14.1 双绕组变压器经济容量的优选 .....	403
10.3 三绕组变压器并联补偿电容器的 节电降耗 .....	312	14.2 三绕组变压器经济容量的优选 .....	409
10.4 双绕组变压器运行电压分接头的 经济运行 .....	320	14.3 三绕组变压器经济台数的优选 .....	413
10.5 三绕组变压器运行电压分接头的 经济运行 .....	325	14.4 双绕组变压器经济台数的优选 .....	418
<b>第11章 变压器经济运行管理 系统</b> .....	332	<b>附录 负载波动损耗系数(<math>K_T</math>)</b> .....	422
11.1 变压器经济运行系统工程 .....	332	<b>参考文献</b> .....	426
11.2 变压器运行位置的优化调整 .....	335		
11.3 变压器与供电线路的优化组合 .....	341		
11.4 对单台运行变压器的优化选择 .....	345		

# 第1章 变压器产品标准的沿革及提高 技术经济指标的节能过程简介

由于变压器制造年代的不同,变压器技术参数有很大差异。据了解,目前变压器社会拥有量中,除20世纪70年代后期至今的绝大多数产品外,还有少量60年代后期产品。在改革开放的大好形势下,电力需求快速增长,我国变压器制造业得到了迅速发展,技术水平有很大进步。只有了解变压器制造标准的沿革,掌握各阶段标准的技术特点,才能对变压器经济运行实行正确的优化、计算和管理。

## 1. 我国油浸式电力变压器标准的沿革

建国初期即20世纪50年代初的三年恢复时期及第一个五年计划期间,当时我国电力变压器制造业实际上是处于无标准状态,机电工业的产品处于仿前苏联阶段,参照执行前苏联早年的国家标准。该阶段的产品技术经济指标过于落后,早已淘汰。

我国第一个电力变压器的部标准JB500—1964《油浸式电力变压器》于1964年7月24日试行,这时期生产的电力变压器其型号多为SJ、SJ1、SJ2,此时的产品尚处于采用热轧硅钢片生产阶段,20世纪60年代的产品目前已基本淘汰。

1971年我国制定了第一部国家标准GB1094—1971《油浸式电力变压器》,该标准于1972年5月1日实施。该标准采用了IEC标准体系,只规定了总则、温升、绝缘水平、短路能力等基本要求,有关性能数据、结构要求编入与之配套的部颁标准JB1300—1304—1973中。该标准的性能数据分为组I和组II两档,组I为采用D330冷轧硅钢带(片)系列,组II为采用D43热轧硅钢带(片)系列。此时的产品多为SJ2~SJ5或S2~S5型。

1979年开始修订国家标准GB1094—1971,制定了GB1094—1979《电力变压器》新的国家标准,该标准于1980年5月1日实施。

进入20世纪80年代中期,由于我国对外技术交流与出口贸易的增加,作为我国技术发展政策,开始提出采用国际标准的要求,因而电力变压器较早等效采用了国际电工委员会当时的新版标准IEC60076.1—5:1976,制定了新的《电力变压器》国家标准GB1094.1—5—1985。与上述标准相配套,又产生了GB6451.1~195—1986《三相油浸式电力变压器技术参数和要求》,该标准于1987年6月1日起实施,该标准中具体规定了各电压等级、不同容量、各种电压组合及调压方式的空载损耗、负载损耗、空载电流、阻抗电压等性能参数和相应的结构要求。该阶段的产品多为S7、SL7SF7、SFZ7的7型产品。目前许多SL7型的铝绕组产品虽已被改造,但7型产品还有相当数量在线运行。

进入20世纪90年代,国际电工委员会已有新版标准IEC60076.1~5:1993,因此国标也及时进行了相应的修改,即现在执行的GB1094.1—1996《电力变压器 第1部分:总则》,于1996年12月1日实施。GB1094.2—1996《电力变压器 第2部分:温升》,于1996年12月1日实施。GB1094.3—2003《电力变压器 第3部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙》,于2004年1月1日实施。GB1094.5—2003《电力变压器 第5部分:承受短路的能力》,于2004年1月1日实施。

与之相配套的 GB6451.1~5-1986《三相油浸式电力变压器技术参数和要求》，也修订为 GB/T 6451-1995，它代替了 GB6451.1~5:1986，并在原 6~10kV、35kV、63kV、110kV 及 220kV 的基础上，增加了 330kV 电压等级变压器的技术参数和要求，于 1996 年 8 月 1 日实施。

## 2. 变压器产品标准，对促进技术进步和节能的分析

变压器标准修订的过程，也就是变压器技术经济指标不断提高的过程、产品不断发展的过程，它与我国电工用硅钢片材料的发展过程密切相关，并直接影响空载损耗、空载电流，进而影响到负载损耗值的降低。

我国电工用冷轧硅钢片的发展，及更先进非晶合金钢片及超导材料的研制，为变压器产品不断赶超世界先进水平，提供了坚实的基础。

标准的不断更新与进步都是和材料的发展与设计、制造技术水平的提高相关的，而新材料的生产是国家综合实力提高的体现。电工用硅钢片材料的进步，具体表现在从热轧硅钢片到低牌号冷轧硅钢片，再发展到较高牌号的冷轧硅钢片，这都导致变压器标准中的主要性能指标——空载损耗、空载电流更低，变压器的效率更高。目前，0.3mm 晶粒取向硅钢片在 GB2521-1996 中的牌号是 30Q150、30Q140、30Q130、30QG130、30QG120、30QG110，武汉钢铁（集团）公司于 1994 年在原有基础上，又引进新日铁钢铁公司先进工艺后，已能生产更高水平 Z6H、Z7H 的产品。由于产量不高，所以还不能广泛采用，但对那些要求损耗低的产品已在具体的设计中采用。

提高变压器产品的技术经济指标，除铁心的材料不断进步外，每个阶段变压器重大的结构设计改进和制造工艺、方法的提高都将使产品减小体积、降低重量，也带来一次次低损耗标准的诞生。因此说现行的 20 世纪 90 年代后的 GB1094.1~5 标准及 GB/T 6451 标准水平的提高，不仅体现了我国硅钢片性能的不断f提高，也体现了我国变压器设计、制造工艺与国际先进水平更接近。

## 3. 新材料的开发与应用为变压器产品节能、高效开辟新天地

在节能降耗、转变增长方式、落实科学发展观的大氛围下，非晶合金变压器逐步走上日程。非晶合金材料是 20 世纪 70 年代问世的一种新型合金材料，它采用国际先进的超级冷技术，将液态金属以  $1 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$  的冷却速度直接冷却形成厚度 0.02~0.04mm 的固体薄带，得到原子排列组合上具有短程有序、长程无序特点的非晶合金组织，这种合金具有许多独特性能特点，如优异的磁性、耐蚀性、耐磨性、高硬度、高强度、高电阻率等。

铁基非晶合金铁心具有高饱和磁感应强度、低矫顽力、低损耗（相当于硅钢片的 1/3~1/5）、低励磁电流、良好的温度稳定性，由非晶合金制造的配电变压器空载损耗较用硅钢片制造 S9 系列变压器下降 70%~80%，空载电流比 S9 下降 40%~60%，负载损耗比 S9、S7 下降 20%~30%。

非晶合金变压器的价格约为同容量 S9 变压器的 1.3~1.5 倍，但由于空载损耗及负载损耗较 S9 型变压器明显下降，因此，非晶合金变压器的总拥有成本（TOC）仍低于 S9 型变压器 10%。根据有关专家测算，非晶合金变压器与 S9 型变压器的价格比接近 1.3:1 后，价差能够在 5 年内收回，从第 6 年起，可享受非晶合金变压器超低损耗所带来的效益。

最近我国又自主研发了非晶合金铁心、高温超导三相 630kVA 电力变压器，并于 2005 年末挂网运行，它将两种新材料非晶合金与高温超导材料同时应用于变压器，由于采用了高

温超导材料，负载损耗仅相当于同容量 S9 型变压器国家标准规定值的 4.5%，在产品结构和原材料选用上均是对具有百年历史传统变压器的突破。

预计到 2010 年，我国 10% 配电变压器将改用非晶材料，届时非晶材料的年需求量约高达 7 万 t。我国千吨级的非晶带材生产线已成功制出达到国际先进水平的 220mm 宽带材，并预计 2010 年可实现 10 万 t 的年产量。因此预计变压器行业，落实国家提出的科学发展观，在节能降耗的实践中将不断有新的突破。

## 第 2 章 供用电系统经济运行综述

国务院关于做好建设节约型社会近期重点工作通知中明确指出：改革开放以来，特别是中央提出加快两个根本性转变以来，我国推进经济增长方式转变取得了积极进展，资源节约与综合利用取得一定成效。但总体上看，粗放型的增长方式尚未得到根本转变，与国际先进水平相比，仍存在资源消耗高、浪费大、环境污染严重等问题，随着经济的加快增长和人口的不断增加，我国淡水、土地、能源、矿产等资源不足的矛盾更加突出，环境压力日益增大。“十一五”是我国全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的关键时刻，必须统筹协调经济社会发展与人口、资源、环境的关系，进一步转变经济增长方式，加快建设节约型社会，在生产、建设、流通、消费各领域节约资源，提高资源利用效率，减少损失浪费，以尽可能少的资源消耗，创造尽可能大的经济社会效益。

为保证国民经济高速稳定的发展和人民生活水平的提高，在确保供用电系统安全优质运行条件下，充分利用我国自主创新的变压器经济运行、电网经济运行及用电设备经济运行节电技术最大限度地降低供用电设备运行中的损耗，为发、供、用电企业和建设节约型社会创造效益。

### 2.1 供用电系统的分类与发展

#### 2.1.1 供用电系统与电力系统

电力系统是由生产（转换）、输送、分配、消耗电能的发电机、变压器、电力线路、电抗器、电容器和用电设备组成的统一整体，亦即由发电厂、输电线路、变电站、配电线路、配电所及电力用户组成的系统。按系统工程进行分类，电力系统是由发电系统、供电系统（输电网和配电网）、用电系统的三大子系统所组成。发电系统将一次能源转换为电能，经过供电系统输送和分配到用电系统。由此可见，供电系统是把发电系统与用电系统进行连接的一个中间系统。而供用电系统则是由供电系统及用电系统所组成的。

由图 2-1 可知：广义供用电系统的范畴是从发电机的出口为起点到用电设备及用电元件的出口为终点。供电系统的子系统：按供电的流程可分为输电网与配电网；按供电地区服务对象可划分为城市供电网、农村供电网与用户供电网及电厂供电网。而用电系统是指用电设备把电能转换为机械能、热能、光能等。也就是说广义供用电系统应既包括发电厂的自用电及升压变压器形成的电厂供电网，又包括用户的变压器、电力线路及所有的用电设备形成的用户供用电网。

##### 1. 输电网

输电网主要是将远离负荷中心的发电厂的大量电能经过变压器升高电压，通过高压输电线路，送到邻近负荷中心的枢纽变电所。同时，输电网还有联络相邻电力系统和联系相邻变电站的作用，或向某些特大用户直接供电。

输电网的电压等级较高，一般在220kV及以上，275~1000kV电压等级的电网称为超高压电网，而1000kV以上电压等级的电网称为特高压电网。

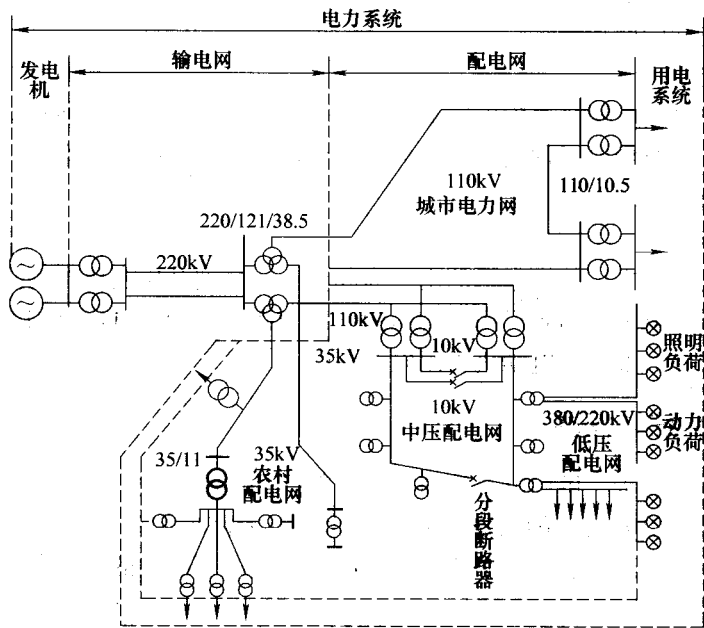


图 2-1 电力系统与供用电系统示意图

## 2. 配电网

配电网的任务是将电源或输电网获得的电能，逐级分配或就地消费，即将高压电能降至方便运行又适合用户需要的各种电压，组成多层次的网络，向用户供电。

配电网主要供给一个地区的用电，因而又称为地方电网。相对于区域电力网来说，它的电压等级和供电范围均要小一些，但它在结构上的最大特点是作为电力网的末端而直接和用户相连，敏锐地反映出用户在安全、优质、经济等方面的要求。

配电网按电压等级来分类，可分为高压配电网、中压配电网、低压配电网。高压配电网的电压等级一般为35~110kV或更高；中压配电网的电压等级一般为6~20kV，它们将来自变电所的电能分配到众多的配电变压器，以及直接供给中等容量的用户；低压配电网的电压等级为380/220V，其功能是以中压配电变压器为电源，将电能通过低压线路直接配送给用户。

## 3. 城市供电网

城市供电网的特点是相对集中，负荷密度大，负荷主要由工业、交通、市政生活用电等构成，用户对供电质量要求高，因此供电网设计标准较高。在安全与经济合理平衡条件下要求供电有较高的安全可靠，城市供电网的接线复杂，要保证调度上的灵活性、运行上供电连续性和经济性。电网的设施、自动化水平及管理水平要求较高，供电网的线路及变电所应满足占地少、容量大、安全可靠、维护量小及城市景观方面的要求，线路应广泛使用地下电缆。

#### 4. 农村供电网

农村供电网是低压配电网，其受电电压等级大都为 10 ~ 35kV，用电电压大都为 380/220V，主要特点是负荷分散、负荷密度小、供电线路长、配电变压器容量小、电网接线复杂，因此农村供电网的网损高。

#### 5. 用户供用电网

工矿企业用户供用电网是由输电网或配电网的供电入口为起点，通过本企业的供电线路及变压器到用电设备及用电元件出口为终点，所以用户供用电网包括本企业的供电线路、变压器、电容器及所有的用电设备。

#### 6. 电厂供用电网

电厂供用电网是从本厂的发电机的出口为起点：一是到升压变压器的高压侧为终点，二是通过厂用变压器及电力线路到厂用电设备的出口为终点，所以电厂供用电网包括升压变压器、厂用变压器、电力线路及电动机等用电设备。

### 2.1.2 供用电系统的发展

随着科学技术的进步，供用电系统高效率的新产品不断问世，以及生产发展、人民生活大幅度的改善，促成用电负荷的快速增长，因此对电力需求和对电能质量的要求也越来越高。所以对现有供用电系统进行改扩建，在提高安全供电可靠性的基础上，降低供用电设备的损耗就显得很有必要。

下面以配电网的扩建与改造为例进行分析。

#### 1. 配电网的基本要求与当前存在的问题

##### (1) 基本要求

按照配电网的任务，其基本要求是：

①供电的连续性和可靠性方面：要求停电的次数少，停电时间短，停电影响的用户和范围尽量少，事故率低；

②电能质量方面：要求向用户提供的电压应保持在规定的电压变动范围内，主要包括电压允许偏差、电压允许波动值、三相电压不平衡度和谐波含有量；

③运行的经济性方面：要求采取先进的技术和科学的管理手段，使组成配电网的各电气元件在运行中消耗的电能（即线损）降至最低。

##### (2) 当前存在的问题

近年来我国的电力工业取得了长足进步，一批批的火电厂、水电厂和核电厂相继建成并投入使用，使我国发电能力居于世界前列。但是电力工业的投资不够合理，投资比例不协调，过多地注重了电源的开发，形成了重电源、轻电网、重输电、轻配电的局面。从表 2-1 中可以看出，我国在发电、输电、配电方面投资的比例与西方发达国家的差异。由于配电网没有取得足够的资金支持，使得配电网建设与改造明显滞后于电源的开发和用电量增长的需求，使得目前的配电网存在着一些问题，主要表现为：

①供电能力不足，容载比低。配电网经常出现超负荷运行，尤其在中低压配电网中更为突出。

②电网结构薄弱，供电可靠性不高。目前城网的供电可靠率达 99.7%，每户每年平均停电 20 多 h。

③电能质量不高。主要表现在电压波动大、超过规定电压变化范围；三相电压不平衡超过三相电压允许的不平衡度；负荷突变，引起可厌的灯光闪烁；谐波含量超过规定，例如有的城乡电网居民家中220V的额定电压低到只有160~170V，用100W灯泡看上去只有15W灯泡的亮度。

④线损率高。我国电网的线损率比国际先进水平要高2.0%~2.5%。我国每年的线损就达7000亿kW·h，是世界上线损落后的国家。线损率高也是技术落后和管理落后的综合反映。

⑤在整个能耗领域中，我国是世界上落后国家。2001年，世界主要国家单位GDP能源比较表明，我国万美元GDP消耗能源约为日本的6.58倍，德国的4.49倍，美国的3.65倍，巴西的2.35倍，印度的1.24倍。2003年我国GDP能耗是高收入国家的5~11倍。

⑥陈旧设备运行。许多可靠性不高、制造工艺落后、绝缘性能差、自身能耗高的产品仍在配电网运行。城市中还存在许多架空线路，且大量架空裸线在运行等。

表2-1 世界各国发电、输电、配电投资比例表

国别	美国	英国	日本	法国	中国
发/输/配	1/0.43/0.7	1/0.45/0.68	1/0.47/0.68	1/0.67/1.6	1/0.23/0.21

## 2. 配电网的建设与改造方向

由于我国国民经济保持快速稳定增长，人民生活水平逐年提高，预计今后对电能的需求不仅在数量上要有大幅度的增长，而且对供电质量也会有更高的要求。作为现代化电网，除保证正常供电外，还应有较强的抗干扰事故和抵御自然灾害的能力，应符合环境保护的要求，应有更高的自动化水平以及便于调度和控制等。因此可看出，城乡电网的建设与改造迫在眉睫，势在必行。

电网建设与改造既要满足近期负荷增长的需求，提高供电可靠性，同时也要进一步把我国电网建设和改造成现代化的电网。因此应将全面规划、建设与改造相结合，根据各地实际情况，注意效益提高水平，改造成“安全、优质、经济型电网”。

电网的规划要以负荷预测为依据，以提高可靠性为目标。负荷预测要有科学性，进而才会有准确性。通过优化计算和技术经济论证，充分考虑实施的可行性，用优化方法做出综合评价，确定规划的技术原则，编制出科学、先进、切实可行、注重实效的规划，用以指导电网的建设与改造。

简化电压等级，减少变压层次，逐步提高配电电压等级，有利于配电网的管理和经济运行。现已确立了以380/220V、10kV、35(63)kV、110kV、220kV的标准电压系列，今后的目标是以220kV为基础，高、中、低压各自采用一级，避免重复降压，减少电能损耗。

建设外围环网，高压深入市区供电。城区外围环网是供应城市配电网的主要电源，对其可靠性要求很高，通过环网的枢纽变电所向城市中心直接供电或经降压配电。我国一些大城市按负荷发展建设220kV外环网，并在考虑筹建更高级500kV的外环网；在小城市形成110kV环网，再按发展建220kV环网。高电压深入城市负荷中心，是城市用电大幅度增加的必然趋势，也是电网改造的一项措施。

为适应日趋严格的环境的要求，配电设备向节能、无油、小型、紧凑方面发展。对于线



路, 高压紧凑架空线路与传统架空线路比较, 其高度可减少 40%。线路走廊用地可节约 50%; 中低压架空集中绝缘线路与架空裸线比较, 年事故率只有原来的 1/7 ~ 1/2, 线路走廊节约 1/2 ~ 2/3, 电压损失减少 40%。对于变压器, 为适应环境和防火要求, 就采用绝缘变压器、干式变压器, 为减少变压器自身损耗, 采用非晶态变压器。这些变压器具有可靠性高、体积小、损耗小、噪声小、不易燃烧等优点。对于开关设备, 应广泛采用 SF<sub>6</sub> 断路器、真空断路器、固态断路器等。

配电自动化是包括变电所、配电网和用户在内的运行、监控、维修、用户管理的具有自动化管理功能的综合一体化系统。由于用户对配电网供电可靠性和供电质量要求越来越高, 这将推动配电自动化向多功能方向发展。

电网规划还应把握好容载比这个指标。变电容载比是配电网变电容量 (kVA) 在满足供电可靠性基础上与对应的负荷 (kW) 的比值, 是宏观控制变电总容量的指标, 也是规划设计时布点安排变电容量的依据。容载比也是反映配电网供电能力的主要技术经济指标之一。容载比过大, 电网建设早期投资增大; 容载比过小, 电网适应性差, 应根据规划区的经济发展情况, 合理选择其数值。当缺乏足够资料时, 可参考采用下列数据: 对 220kV 电网城市电网的容载比一般为: 1.6 ~ 1.9; 对 35 ~ 110kV 电网为 1.8 ~ 2.1。农村电网因可靠性要求低一些, 容载比取值可以比上述值适当低一些。

综上所述, 降低电网的线损是城乡电网改造中的重要目标之一。因此在城乡电网改造过程中应全面推广电网改造节电技术, 这是在不增加电网改造投资的前提下, 运用电网改造节电技术优化计算, 来提高电网结构中的技术含量, 达到降低线损的目标, 从而把电网改造成“安全优质经济型电网”。

## 2.2 供用电系统经济运行的内涵与特点

### 2.2.1 供用电系统电能损耗的构成

《中华人民共和国节约能源法》明确指出: “节能是国家发展经济的一项长远战略方针”。根据有关资料估算: 从发电到供电, 一直到用电的过程——广义电力系统中的各种电气设备 (包括发电机、变压器、电力线路、电动机等) 全部的电能损耗约占发电量的 28% ~ 33%, 如图 2-2 所示。这对全国来说一年就有 6761 ~ 7968 亿 kW·h 电能损耗在运行的电气设备中, 这相当于 10 个中等用电量的省用电量之和, 这说明节电潜力非常大。为保证国民经济高速稳定发展, 寻求一条不用投资就能节电的途径具有重大意义。电网经济运行就是不用投资就取得明显节电效果的一项内涵节电技术。

广义电力系统是由发电、供电、用电三部分组成, 所以电力系统的电能损耗也应包括发、供、用电设备的全部损耗, 即发电损耗、供电损耗、用电损耗之和为电力系统总损耗。如果发、供、用电设备的功率损耗都以损耗率来表示, 则广义电力系统的损耗率可用下式表示:

$$\Delta A_{\text{总}} \% = \Delta A_{\text{发}} \% + \Delta A_{\text{供}} \% + \Delta A_{\text{用}} \%$$

由电力系统损耗率构成图中可以看出, 发电设备总电能损耗  $\Delta A_{\text{发}}$  主要包括发电机、升压变压器、厂用电变压器及其他电气设备的电能损耗和厂用电消耗, 这一部分电能损耗率