

JIEDIAN JISHU
JIQI GONGCHENG YINGYONG



最新版

节电技术 及其工程应用

刘利军 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

JIEDIAN JISHU
JIQI GONGCHENG YINGYONG

节电技术 及其工程应用

刘利军 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书较为全面地阐述了节电技术的基本概念和基础理论,列举了一些常用的节电方法和节电应用电路及节电产品,内容系统全面、实用性高、可读性强。

本书共分8章,主要包括:节电的意义及相关知识、照明节电技术及节电装置、交流电动机节电理论基础及合理选择、电动机节电控制应用技术、无功补偿节电控制技术、谐波的基础知识及滤波节电技术、电加热及空调节电技术与应用、节电产品及节电装置的应用。

本书可供从事节电工作的工程技术人员、管理人员学习使用,可作为技工学校、职业学院、技师学院师生的教材及中高级电工和技师的培训教材,也可供大专院校机电类专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

节电技术及其工程应用/刘利军编著. —北京:中国电力出版社, 2010.9

ISBN 978-7-5123-0800-8

I. ①节… II. ①刘… III. ①用电管理—节能 IV. ①TM92

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第166837号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011年1月第一版 2011年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 23印张 639千字

印数 0001—3000册 定价 48.00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

前言

节电技术及其工程应用



随着生产力的进步和工业现代化的发展，能源消耗的速度也越来越快，远远超过了人口增长的速度，而煤、石油、天然气这些主要能源是不可再生的。据世界能源组织（IEA）报道，按照现在的经济发展速度，预计世界能源储量只能再用几十年。能源问题已经到了非常严峻的地步，节约能源作为人类共同面临的重大问题，已引起世界各国的高度重视。

电能是提高现代人类生存质量不可缺少的能源之一，也是人类社会生存和发展的物质基础。节约电力资源是节能的重要内容，对于以火电为电能主力的我国来说，节约电能的同时还意味着节约了大量的煤炭，减轻了对生态环境的损害。我国在经济飞速发展的同时电力越来越紧张，能源的供需矛盾已成为制约我国经济建设和生产发展的重要因素。近几年，电力供应形势紧张，使得部分电网在缺少备用容量甚至零备用的情况下运行，对电网安全造成巨大威胁。电力需求缺口巨大，为了维持经济的持续高速发展，提高能效、节约能源就成了重中之重。

为此，国务院从战略和全局的高度提出了“节约与开发并重，把节约放在首位”和“高度重视节约能源和原材料，提高资源利用效率”的方针，并做出了《关于加强节能工作的决定》以及在“十一五”期间 GDP 能耗降低 20% 左右的约束性指标，把节能减排列为重要国策，号召全民节约用电，建设节约型社会。

为响应国家号召，节能减排发展低碳经济，提高人们的节电意识，特别是提高从事节电管理人员、技术工程人员以及相关专业人员的节电理论和技术水平，很好地掌握节电的一些基础知识和技术技能，特此编写本书，以供广大读者在节电实践中学习和参考。

本书本着理论联系实际、突出实用性的原则，以通俗易懂的语言和简明扼要的文字及图表，较为全面系统地阐述了节电的基本概念、原理，各种用电负载的结构、节电控制方式及种类，部分节电产品的实际应用电路及应用实例等。

本书在编写过程中，山东省节能办公室主任郑晓光给予了高度关注，还得到了山东瑞斯高创股份有限公司董事长刘黎明及多家生产厂商的支持，北京理工大学彦波教授对本书提出了宝贵的建议和意见。车伟、胡建香、王智林等为全书的图、表绘制、排版也付出了辛勤的劳动，在此一并表示衷心的感谢。本书参考了国内外相关节电技术领域的许多文献，在此谨向相关作者深表谢意。

由于时间和水平有限，疏漏之处在所难免，敬请读者不吝赐教和指正。

编 者

目 录

节电技术及其工程应用



前言

第一章 节电的意义及相关知识	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 工业企业供电损耗及降损措施	5
§ 1-3 节电方案的制订和实施	13
第二章 照明节电技术及节电装置	16
§ 2-1 照明的基本概念	16
§ 2-2 几种常用电光源的结构原理及节能型光源简介	21
§ 2-3 电气照明的节约用电	28
§ 2-4 照明节电控制装置	33
§ 2-5 路灯专用节电控制装置	41
第三章 交流电动机节电理论基础及合理选择	48
§ 3-1 电动机节电的意义	48
§ 3-2 三相异步电动机的理论知识	48
§ 3-3 电力拖动系统电动机的合理选择	59
第四章 电动机节电控制应用技术	93
§ 4-1 电动机的调压节电应用技术	94
§ 4-2 电动机的调速节电应用技术	106
§ 4-3 高压电动机变频节电技术	147
第五章 无功补偿节电控制技术	167
§ 5-1 无功补偿的基本概念	167
§ 5-2 降低无功、提高功率因数的节电方法	170
§ 5-3 利用电容无功补偿的节电原理和方式	172
§ 5-4 异步电动机无功功率就地补偿	174
§ 5-5 绕线转子异步电动机同步化运行	181
§ 5-6 无功补偿节电装置产品介绍	183
第六章 谐波的基础知识及滤波节电技术	207
§ 6-1 谐波的基本概念	207
§ 6-2 无源滤波器	216
§ 6-3 有源电力滤波器	219

§ 6-4 滤波节电产品简介	229
第七章 电加热及空调节电技术与应用	235
§ 7-1 电加热设备的节电技术	235
§ 7-2 感应电加热节电技术及电路设计	260
§ 7-3 空调节电技术与应用	276
第八章 节电产品及节电装置的应用	301
§ 8-1 节能型机电类节电产品	301
§ 8-2 动力设备在调速节电方面的合理应用	304
§ 8-3 节电改造工程实施案例	309
 附录 A 节能型电动机主要技术参数	 329
附录 B CJ20 系列交流接触器技术参数	346
附录 C 小型单相变压器的计算	350
附录 D 部分国产电力补偿电容器技术性能及参数	355
 参考文献	 362

第一章

节电的意义及相关知识



节约用电不能简单地理解为少用电，不是靠关灯、停机器、拉闸、少工作、少生产而节省电能，其真正含义应该是“有浪费就有节约”，有浪费电就有节电，没有电能浪费也就不存在节电。它是以合理使用电能、提高电能利用率为目标，通过科学管理和科技进步、技术创新，在使用相同电能的前提下取得最大的经济效益，最大限度地提高用电效率，这样的概念和理念才是对节电含义的科学认识和理解。

电能浪费的主要表现形式为：①输配电线路和供电线路的线路损耗（ I^2R 损耗），线路传输过程中的磁场损耗，分布电容损耗等；②由故障引起的损耗，如漏电、局部短路等；③动力设备匹配不合理（如“大马拉小车”）而造成的多余有功功率损耗；④动力设备运行中的机械损耗、过热损耗、起动过程损耗、工艺不合理损耗等；⑤其他方面如技术落后、设备陈旧、生产工艺落后所造成的多余能耗等。上述这些电能的浪费可以通过现代科技手段、技术措施、技术改造、安装节电设备等进行改良。在保证或满足生产工艺、生产条件的情况下，通过一系列普通的或高科技的节电技术在相同生产量、生产规模的情况下降低多余的电能损耗，使单位电耗降下来，从而达到节约电能、提高设备运行效率和电能利用率的目的，这就是真正意义上的节电概念和节电理论。

§ 1-1 概 述

一、节电的重要意义

能源的开发和控制是一个世界性的课题，它直接关系到人类的生存和发展，没有哪一个国家不在奋力寻求解决能源问题的有效方案。能源的储量是有限的，解决能源问题的重点是能源控制。

电能是现代社会大量应用的一种能源形式，其优点是生产和变换比较经济、传输和分配比较容易、使用和控制比较方便等。自从使用了电能以后，人类从繁重的体力劳动中得到了解放，大大提高了劳动生产率，并能完成手工劳动不易或不能完成的生产任务，特别是科技快速发展的今天，电能已成为国民经济、人民生活、工农业生产、科研中不可缺少的能源之一。

我国正面临长期性的电力短缺和紧张，电力缺口较大且正在急剧增大，而且我国电力来源的结构（见表 1-1）也对未来的电力市场造成了巨大的潜在的威胁，因此节约能源显得尤为迫切，尤其是节电。

从表 1-1 可以看出，火力发电是我国电力的最主要来源。火力发电的原料是煤，它是一种不可再生的能源，但我国已由原来最大的煤炭生产国和消费国转变为进口国，电力成本将因此而不断上扬。并且，随着电力的普及，即使接近亚洲市场的

表 1-1 我国电力来源结构

电力来源	所占比例（%）
火力发电	80
水力发电	15
核电	5



平均电力使用水平,也会使我国的电力市场不堪重负。如何解决如此严峻的问题?怎样才能降低发电煤耗,减少二氧化碳排放形式的温室效应以及酸雨对环境污染带来的危害?除了抓紧能源的开发外,最有效、成本最低的解决方案就是大力推行节电技术改造。近年来,我国电力发展十分迅速,但仍不能满足国民经济发展和人民生活水平提高的需要,全国持续缺电的状况仍在不断升级,从今后一段时间发展来看,电力仍然是制约国民经济和社会发展的主要因素之一,因此,在加快电力建设的同时,必须重视节电,提高电能利用率,坚决贯彻国家有关“开发与节约能源并重,把节约放在首位”和“高度重视节约能源和原材料,提高资源利用效率”的方针,不论是电力供应紧张还是暂时有所缓解,我们都要始终重视节电工作,节电改造的步伐时刻不能停止,不能有任何松懈,长期牢牢树立节电的意识和理念,狠抓节约用电不放松。为此,我们必须走资源节约型的道路,逐步建立起资源节约型的发展经济结构,在努力开展节能节电的基础上发展电力和能源工业。

从全国用电情况来看,节电的重点是工业,工业用电占全国用电量的 $65\%\sim 70\%$,而且运行效率很低,平均水平比先进国家低 $20\%\sim 30\%$,据统计降低电耗直接节能的企业只占 30% ,并且电能浪费现象普遍存在;另外,国内先进企业与落后企业间的耗电差距很大,据测算,我国电炉钢、铁合金、电解铝等八大耗电产品的电耗,如果从全国平均水平提高到先进水平,每年可节电上百亿 kWh。除上述这些生产技术装备落后而造成的电能浪费以外,设备管理落后、节电观念淡薄、单位产品电耗上升、节电管理水平低、群众节电意识差等方面也是造成电能浪费的重要因素。比如,高能耗企业畸形发展,高能耗产品转入乡镇企业,电力浪费严重。如某小水泥厂年产量仅 15 万 t,总耗电量却达到 1.95 亿 kWh。一方面节能的任务仍很艰巨,另一方面主要能耗的工业企业在节能方面的潜力很大。据不完全统计,全国有风机、水泵、压缩机 1500 万台以上,耗电占全国总发电量的 $40\%\sim 50\%$ 。现在我国风机的平均运行效率为 50% ,水泵的平均运行效率为 41% ,有的仅为 5% ,如做好这些传动电动机的经济运行或进行节电技术改造、加装节电装置等,只要将系统电能利用率提高 $10\%\sim 20\%$,便可节电 300 亿 kWh 以上。由此可见,工业的节电空间和市场是十分巨大的,做好工业企业的节电工作意义非常重大,不仅能够一定程度上缓解能源供需矛盾和促进经济的发展,而且还会为企业带来不可低估的经济效益。

综上所述,节约用电,就是研究分析用电过程中电能消耗的规律,采取一些技术措施和管理手段,消除用电不合理和浪费现象,减少电能损耗,提高电力设备和用电设备的利用率和运行效率。节能减排是我国的重要国策,节约用电是我国社会主义现代化建设的基本方针,在发展国民经济中具有十分重要的意义。归纳起来节约用电的意义主要体现在如下方面:

(1) 缓和电力供需矛盾。通过认真贯彻执行党中央、国务院有关“开发与节约能源并重,把节约放在首位”的方针,取得了显著的经济效益和社会效益。大力倡导节约用电,用节能来缓和能源供需矛盾和促进经济的发展是完全可能的。

(2) 提高电能使用的经济效益。既可降低单位产品电能消耗,又能在一定的条件下提高劳动生产率和产品质量,从而降低产品的成本,提高企业的效益和市场竞争力。

(3) 促进工厂企业设备的技术改造和工艺改进工作。由于节约用电工作不断深入,促进了设备的挖潜、革新、改造工作,出现了一些耗电低、效率高的电气设备和用电设备,如低损耗的变压器、高效率节电风机、水泵等。大量使用节电产品、节电装置等一系列由高新技术生产的节电设备,也使节电水平步入了一个新的台阶。

二、国内节能形势及国家相关方针政策

目前能源问题已经成为制约我国经济社会发展的重要因素,为此国家从战略和全局的高度发布了《关于加强节能工作的决定》,要求各级地方政府和企业要充分认识节能工作的重要性和紧迫性,并采取有力措施,调动社会各方面力量做好节能工作。

(1) 电费支出通常为企业四项最大成本之一,对多数企业而言,用电成本已经成为企业经营成本中紧随原材料和人工成本之后的第三大开支。随着我国政府建设资源节约型社会号召的发出,国内企业开始向电能要效益。节电的出路在于坚持科学管理,依靠科技进步、技术创新,走合理用电、节约用电、提高电能利用率的道路,大幅度地降低单位产品电耗,以最少的电能创造最大的财富。

(2) 由于长期以来我国电力行业缺乏竞争,导致了电力的不均衡发展,直接后果就是长期性的电力短缺。每年政府都在电力改造上投入巨资,以求有效解决我国在电力资源上潜在的隐患。目前,在开源方面要大力开发煤炭、石油、天然气,并加快电力建设步伐,要积极发展火电,大力开发水电,有重点、有步骤地建设核电站。在节能方面要大力开展节煤、节油、节电等节能工作。

(3) 21 世纪,企业的成功除与劳动生产率有关外,更取决于企业的资源生产率。更具体的地说,就是能效。在能效经济主导的时代,谁的能效高,或者说谁能够创造出帮助顾客提高能效的产品和技术,谁就能够成为赢家。显然,能效经济已经成为趋势。随着地球的暖化和区域不稳定可能引发的能源危机,能效经济到来的速度正在加快。在能效经济时代,推广应用节电新技术、新工艺已成为必然,而利用高新技术生产的节电装置以及其他节电产品将成为我们的必需品。

(4) 我国政府当前关于能源发展的总体方针是“坚持开发与节约并重,把节约放在首位”,并相继出台了《中华人民共和国节约能源法》、《中华人民共和国电力法》、《节约用电管理办法》等政策法规,其中《节约用电管理办法》的第十四条“鼓励推广经过国家论证的节约用电产品,鼓励建立能源服务公司,促进高耗电工艺技术和设备的淘汰和改造,传播节约用电信息”,第二十条“对应用国家推广和经过国家节能论证的节约用电产品的电力用户,可向省级价格主管部门和电力行政管理部门申请,减免新增电力容量供电工程贴费,价格主管部门在征求电力企业意见的基础上予以协调处理”。由此可见,我国政府在节电推广上的举措都已表明了节电的必要性和政府的支持力度。

(5) 2005 年 7 月《国务院关于做好建设节约型社会近期重点工作的通知》发出后,各级政府对建设节约型社会和循环经济加大指导力度和政策支持力度,企业对节能降耗已由认知、重视向需求过度。这在一些大型企业集团及众多境内外上市企业的节电改造中得到证实。

(6) 2006 年温家宝总理在《政府工作报告》中进一步就资源节约和节能降耗作出要求,“鼓励发展节能降耗产品和节能省地型的建筑”,“抓紧制定和完善各行业节能节水节地节材标准,推进节能降耗重点项目建设”,“鼓励发展节能降耗产品和节能省地型建筑”,“大力推动以节能降耗为重点的设备更新和技术改造”。2006 年单位国内生产总值能耗降低 4% 左右,能耗指标首次被列为宏观调控目标。

(7) 党的十六届五中全会提出把节约资源作为基本国策,“十一五”规划《纲要》进一步把“十一五”时期单位 GDP 能耗降低 20% 左右作为约束性指标。

(8) 2006 年 7 月 26 日,受国务院委托,国家发展改革委与各省、自治区、直辖市人民政府和部分中央企业签订了抓好千家高耗能企业节能目标责任书,这是对国家和社会的庄严承诺。

(9) 2006 年 8 月 6 日,《国务院关于加强节能工作的决定》发布。

(10) 2007 年 6 月 24 日,我国修订《节约能源法》,确保如期实现节能减排目标。这意味着,我国将借助法律手段推动“十一五”节能减排目标如期实现。

(11) 2007 年 7 月 31 日,全国人大财经委调研组在天津调研节能减排工作。全面实施燃煤锅炉改造、热电联产等十大节能重点工程。

(12) 2008 年 4 月 1 日,《节约能源法》施行。新的《节约能源法》为我国科学发展再添法律利器,将有助于解决当前我国经济发展与能源资源及环境之间日益尖锐的矛盾。明确规定:国家实行节约资源的基本国策,实施节约与开发并举、把节约放在首位的能源发展战略。



(13) 2008年7月2日,温家宝总理主持召开国务院节能减排工作领导小组会议明确节能减排工作重点。

(14) 2008年8月29日,国家发改委、科技部、工业和信息化部、财政部、住房城乡建设部、交通运输部、商务部、税务总局、质检总局、国管局、国务院法制办11部门要求进一步做好《节约能源法》的贯彻实施,提出了“十一五”单位GDP能耗降低20%左右的约束性指标。这是贯彻落实科学发展观,加快建设资源节约型、环境友好型社会的重大举措。

(15) 为应对全球气候变化,保护地球环境,2009年11月26日,国务院总理温家宝代表中国政府宣布:到2020年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%。

(16) 2009年第三季度以来,高耗能、高排放行业快速增长,一些被淘汰的落后产能死灰复燃,能源需求大幅增加,能耗强度、二氧化硫排放量下降速度放缓甚至由降转升,化学需氧量排放总量下降趋势明显减缓。截至2010年5月,全国单位国内生产总值能耗累计下降14.38%,化学需氧量排放总量下降9.66%,二氧化硫排放总量下降13.14%。

(17) 2010年是“十一五”规划的最后一年,国家出台《国务院关于进一步加大力度确保“十一五”节能减排目标的通知》,并要求地方各级人民政府对本行政区域节能减排负总责,政府主要领导是第一责任人。发展改革委要加强节能减排综合协调,指导推动节能降耗工作,环境保护部要做好减排的协调推动工作,统计局要加强能源监测和统计。有关部门在各自的职责范围内做好节能减排工作,加强对各地区贯彻落实本通知精神的督促检查,确保实现“十一五”节能减排目标。

(18) 国家发改委、电监会、能源局联合下发通知,全面清理对高耗能企业的用电价格优惠。通知要求,限期取消现行对电解铝、铁合金、电石、烧碱、水泥、钢铁、黄磷、锌冶炼8个高耗能行业用电价格优惠。省级节能主管部门组织各级节能监察机构于2010年6月底前对重点用能单位进行专项能源监察审计,提出超能耗(电耗)限额标准的企业和产品名单,实行惩罚性电价,对超过限额标准一倍以上的,比照淘汰类电价加价标准执行。

(19) 2010年3月,国家发改委等四部委印发了《关于加强合同能源管理,促进节能服务产业发展的具体意见》,并配套出台诸多优惠政策,将节能服务提升至产业高度予以重视和引导,明确推行合同能源管理模式,协助政府和用能单位完成节能任务。

三、节约用电的途径

节约用电就是要降低电能损耗,提高电能的利用率。工厂企业中,电能利用率就是利用的有效电能与电能总耗之比,其表达式为

$$\eta_{\text{el}} = \frac{\sum W_{\text{gx}}}{W_{\text{sy}}} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 η_{el} ——工厂企业电能利用率,%;

$\sum W_{\text{gx}}$ ——工厂企业全部利用的有效电能,kWh;

W_{sy} ——工厂企业电能总耗,kWh。

有效电能就是工厂企业在用电过程中为达到生产工艺要求在理论上必须消耗的电能,又称理论电能。如生产1t烧碱需耗电1542kWh,即1542kWh/t为烧碱的理论电耗。电能总耗是指工厂企业的受电量,或在用电过程实际供给的电能,又称实际电耗。所以,电能利用率就是产品理论电耗和实际电耗之比。

工厂企业电能总耗和有效电能之差,即为工厂企业中的损耗电能。在损耗电能中,包括设备损耗与管理损耗。所谓设备损耗是电能输送、转换和做功的过程中,为了克服电的、磁的、机械的和其他方面原因造成的阻力,在电力线路、变压器等电气设备和生产机械中损耗的电能。设备性能差,电能转换传递次数多,设备损耗就要大。管理损耗,是由于操作水平低、工艺参数不合理、工

序之间不协调以及其他原因造成的产量下降、产品报废、发生事故和在各个生产环节中跑、冒、滴、漏等引起的电能损耗。只要减少上述两方面的电能损耗，就可以提高电能利用率，节约电能，主要方法有：

(1) 采用新技术，利用新材料，改革落后工艺。一些节电新技术、节电新产品、节电新材料不断产生，并取得了显著的效果。例如，硅整流技术在整流设备上的应用，电动发电机组效率比过去提高 20%~30%；在水泵、风机上安装电动机节电装置后，可节电 20%~40%；将电阻式加热改为电子加热装置后，节电率可达 50% 以上；又如在电加热炉上采用硅酸铝纤维作保温耐火材料，可取得节电 20%~30% 的效果，等等。

生产工艺不仅对产品的质量和数量有决定性影响，而且关系到用电的多少。例如，在机床加工中，采用以铣代刨的工艺方法，可使铸件的耗电量减少 30%~40%。

不断研究和应用节电的新技术、新产品、新材料，不断改进生产工艺，可节约大量的电能。

(2) 改造旧设备，加强设备检修。工厂企业中的用电设备是电能的消耗者，改造旧设备是节约用电的重要途径。例如，在直流电动机调速系统中，广泛采用晶闸管调速代替原来的电阻调速，可节约用电 20%，将一些调速节能差的电动设备改为交流变频调速或加装节电控制系统，可进一步节约用电 30% 左右。

另外，电气设备和用电设备在长期使用的过程中，工作效率将会逐渐降低，使电能损耗增加。因此，必须加强设备检修，提高检修质量，消灭跑、冒、滴、漏现象，以提高设备的使用效率和电能利用率。

(3) 减少机械摩擦和磨损，降低电气设备的供电损耗。任何机械传动装置运行时都存在摩擦。摩擦分滑动摩擦、滚动摩擦和静摩擦。因为静摩擦力最大，滚动摩擦力最小，所以，广泛使用滚动摩擦可节约用电。另外，采用合适的润滑剂，可以减少摩擦和磨损，降低电能消耗。

(4) 降低电力线路和变压器等电气设备的供电损耗，是节约电能的主要途径之一。

§ 1-2 工业企业供电损耗及降损措施

一、供电损耗的组成

企业的供电网络运行中将在电力线路和变压器等电气设备中产生功率损耗和电能损耗，其损耗电量占地区电网输入的电量的百分比称线路损耗率，简称线损率，其表达式为

$$\text{线损率} = \frac{\text{损耗电量}}{\text{输入电量}} \times 100\% \quad (1-2)$$

损耗电量通常是根椐企业总降压变电所的总电能表所计量的，由输入电量和各部门变电所电能表所计量的总和相减而得。

线损一般可分为可变损耗和固定损耗两部分。可变损耗就是指当电流通过导体时所产生的损耗，与电流的二次方成正比，与导体本身电阻成正比。对一定截面导线来说，其损耗大小取决于通过电流的大小。固定损耗则与电流大小无关，只要接通电源，电网就存在损耗，当电源电压变化不大时，其损耗基本是固定的。

可变损耗包括：①总降压变压器、配电变压器的铜损；②配电线路和接户线等导线上的铜损。

固定损耗包括：①总降压变压器、配电变压器的铜损；②电缆线路，电容器及其他电器上的介电损耗；③电能表及各种计量仪表的电压线圈以及互感器上的铁损。

工厂企业中的各种供电损耗很难准确掌握，但是可以通过理论计算，了解供电网络各部分损耗的构成状况，为加强管理、降低损耗、节约用电提供重要的依据。

二、供电损耗的计算

(一) 电力线路电能损耗计算

企业线损包括变压器损耗和线路损耗。我国规定降低企业受电端至用电设备的线损，线损率应达到下列指标：①一次变压 3.5% 以下；②二次变压 5.5% 以下；③三次变压 7% 以下。

大型企业往往是二次变压，少数为三次变压，线损是很大的，不仅是经济损失，更重要的是线损过大，会使用电设备的电压过低，影响正常运行。

线路年损耗计算公式为

$$\Delta W = \Delta P \tau \tag{1 - 3}$$

式中 ΔW ——线路年损耗，kWh；
 ΔP ——线路中有功功率损耗，kW；
 τ ——年最大功率损耗时间，h。

年最大功率损耗时间 τ 定义为：线路以最大负荷（计算负荷）连续运行，则在时间 τ 内，线路中所损耗的电能，恰好等于线路按实际负荷曲线运行 1 年（8760h）所损耗的电能。年最大功率损耗时间 τ 与最大负荷年利用小时数 $\tau_{\max}$ 及功率因数 $\cos\varphi$ 的关系见表 1 - 2。

表 1 - 2 年最大功率损耗时间 τ 与最大负荷利用小时数 $\tau_{\max}$ 及功率因数 $\cos\varphi$ 的关系

$\begin{matrix} \tau \text{ (h)} \\ \cos\varphi \\ \tau_{\max} \text{ (h)} \end{matrix}$	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0
2000	1500	1200	1000	800	700
2500	1700	1500	1250	1100	950
3000	2000	1800	1600	1400	1250
3500	2350	2150	2000	1800	1000
4000	2750	2600	2400	2200	2000
4500	3150	3000	2400	2700	2500
5000	3600	3500	3400	3200	3000
5500	4100	4000	3950	3750	3600
6000	4650	4600	4500	4350	4200
6500	5250	5200	5100	5000	4850
7000	5950	5900	5800	5700	5600
7500	6650	6600	6550	6500	6400
8000	7400		7350		7250

式（1 - 3）是根据线路的最大负荷和最大功率损耗时间来进行线路电能损耗的近似计算公式。由于通过线路的电流是经常变化的，要算出某一时间段（1 个代表日）内线路中的电能损耗，必须掌握电流随时间变化的规律。若已知线路的日负荷曲线或已知实测负荷记录，可以用均方根电流法来计算线路的电能损耗。

$$\Delta P = 3 I^2 R \times 10^{-3} \tag{1 - 4}$$

式中 ΔP ——线路中有功功率损耗，kW；
 I ——每相线路中的总电流，A；
 R ——每相线路中的导线的电阻， Ω 。

按照功率损耗乘以全天 24h, 即为代表的电能损耗, 那么其表达式为

$$\begin{aligned}\Delta W &= 3(I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_{24}^2)R \times 24 \times 10^{-3} \\ &= 3I_{\text{rms}}^2 R \times 24 \times 10^{-3}\end{aligned}\quad (1-5)$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \cdots + I_{24}^2}{24}}$$

式中 $I_1, I_2, \cdots, I_{24}$ ——代表日每小时的电流, A;

R ——每相导线电阻, Ω ;

I_{rms} ——日均方根电流, A。

1. 架空供电线路电能损耗的计算

架空线路的电能损耗包括: ①基本损耗 ΔW_1 ; ②导线通过电流由于发热引起的附加损耗 ΔW_2 ; ③周围空气温度不足 20°C 时由于电阻变化引起的校正值 ΔW_3 。即

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \Delta W_3 \quad (1-6)$$

基本损耗可用式 (1-5) 进行计算。

附加损耗 ΔW_2 可由下式计算

$$\begin{aligned}\Delta W_2 &= 3I_{\text{rms}}^2 \Delta R_{\text{fr}} \times 24 \times 10^{-3} \\ \Delta R_{\text{fr}} &= R_{20} \alpha (t_{r2} - 20) \left(\frac{I_{\text{rms}}}{I_{r2}} \right)^2\end{aligned}\quad (1-7)$$

式中 ΔR_{fr} ——导线通过电流发热增加的电阻, Ω ;

t_{r2} ——导线最高允许温度, $^\circ\text{C}$, 对铝线及钢芯铝线, $t_{r2} = 70^\circ\text{C}$;

I_{r2} ——周围空气温度为 20°C 时导线允许通过的最大电流, A;

R_{20} ——导线 20°C 时的电阻, Ω ;

α ——导线电阻温度系数, 对铜和铝, $\alpha = 0.004$ 。

校正值 ΔW_3 (kWh) 可由下式计算

$$\Delta W_3 = \Delta W_1 \alpha (t_g - 20) = 3I_{\text{rms}}^2 R_{20} \alpha (t_g - 20) \times 20 \times 10^{-3} \quad (1-8)$$

式中 t_g ——测计导线周围平均空气温度, $^\circ\text{C}$ 。

2. 电力电缆线路电能损耗计算

电缆线路中的电能损耗包括导体电阻损耗, 介质损耗和铅包、钢铠中的涡流损耗, 而电缆的敷设方法、土壤或水底温度以及集肤效应和邻近效应等对电缆的可变电能损耗都有影响, 所以要精确计算电缆线路的电能损耗很复杂。一般情况下, 介质损耗为导体电阻损耗的 $1\% \sim 3\%$; 铅包损耗约为线路损耗的 1.5% ; 钢铠在三芯电缆中, 如导线截面积不大于 185mm^2 , 线路损耗可忽略不计。其导体电阻损耗为

$$\Delta W = 3I_{\text{rms}}^2 r_0 l \times 24 \times 10^{-3} \quad (1-9)$$

式中 r_0 ——电缆线路每相导线单位长度的电阻值, Ω/km ;

l ——电缆线路长度, km。

3. 电力电容器的电能损耗

电力电容器的损耗, 主要是介质损耗, 其计算式如下

$$\Delta W = Q_c \tan \delta \times 24 \quad (1-10)$$

式中 Q_c ——电力电容器的容量, kvar;

$\tan \delta$ ——介质损耗角 δ 的正切值, 一般可取 0.004。

4. 6~10kV 配电线路的电能损耗计算

从工厂企业总降压变电所到车间变电所的 6~10kV 配电线路的特点是分支多、负荷点多、应



用面广、导线型号不同,而各配电变压器的负荷功率因数不同,所以各分段中电流不是代数和差关系,而是相量和差关系。因此,在进行电能损耗计算时,一般采用逐点计算法,即先将全线路按每个负荷点分段,求出各段最大电流和等效电阻,最后根据均方根电流法和等效电阻求出全线的电能损耗,计算步骤如下:

(1) 根据图 1-1 所示的各负荷点分布情况确定分段,并计算出各分段电阻,画出图 1-2 所示的计算图。

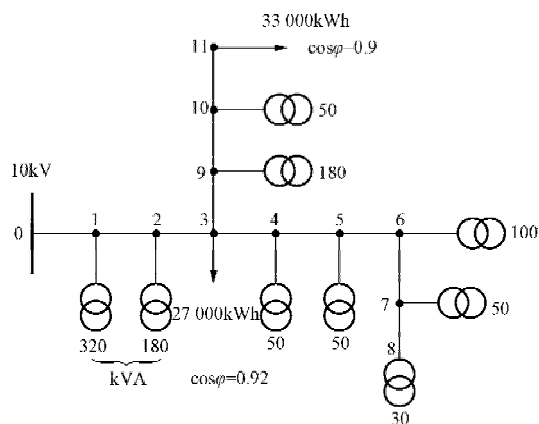


图 1-1 配电线路接线图

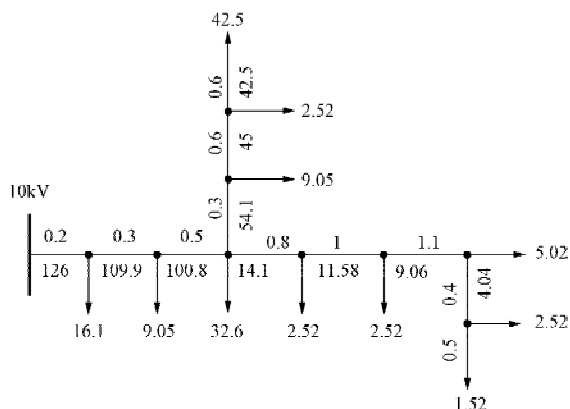


图 1-2 配电线路计算数据图

(2) 根据实测日负荷的记录,确定线路首端最大电流 $I_{\max}$ 、日平均电流 I_{av} 、日均方根电流 I_{rms} ,计算式如下

$$I_{\text{av}} = \frac{I_1 + I_2 + \cdots + I_{24}}{24} \quad (1-11)$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_{24}^2}{24}} \quad (1-12)$$

根据线路全月供电量 W ,计算当月的日平均供电量

$$W_2 = W/30 \quad (1-13)$$

当线路日供电量 W_1 与日平均供电量 W_2 相差较大时,应对日电流值进行修正,即

$$\left. \begin{aligned} I'_{\max} &= I_{\max} \frac{W_2}{W_1} \\ I'_{\text{av}} &= I_{\text{av}} \frac{W_2}{W_1} \\ I'_{\text{rms}} &= I_{\text{rms}} \frac{W_2}{W_1} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

(3) 根据高压用户的月用电量 W 、平均功率因数 $\cos\varphi$,计算高压用户日平均电流 I_{avk} ,计算式为

$$I_{\text{avk}} = \frac{W}{\sqrt{3}U t \cos\varphi} \quad (1-15)$$

式中 U ——配电线路的额定电压, kV;

t ——全月实用的小时数。

根据线路首端的最大电流 $I_{\max}$ 和平均电流 I_{av} 以及高压用户的平均电流值 I_{avk} ,计算高压用户的最大电流

$$I_{\max k}=I_{\text{avk}}\frac{I_{\max}}{I_{\text{av}}}\tag{1-16}$$

(4) 把线路首端的最大电流减去各高压用户的最大电流，为负荷点总的最大电流，即

$$\sum I_{\max \text{B}}=I_{\max }-\sum I_{\text{avk}}\tag{1-17}$$

负荷点总的最大电流按各负荷点配电变压器的容量比例分配，可确定其各负荷的最大电流

$$I_{\max \text{B}}=\frac{\sum I_{\max \text{B}}}{\sum S_{\text{B}}}\times S_{\text{B}}\tag{1-18}$$

式中 $I_{\max \text{B}}$ ——某负荷点最大电流；
 $\sum I_{\max \text{B}}$ ——负荷点总的最大电流；
 $\sum S_{\text{B}}$ ——负荷点配电变压器总的容量；
 S_{B} ——某负荷点配电变压器容量。

(5) 按图 1-2，以线路首端最大电流依次减去各负荷点的最大电流，即为各分段的最大电流。将各负荷点的最大电流、各高压用户最大电流和分段的最大电流画到图 1-2 中。

(6) 计算路线的等效电阻。线路等效电阻的意义是：当线路首端最大电流通过等效电阻时，所产生的电能损耗恰好等于线路在同时期按实际最大电流运行时所产生的电能损耗，所以线路等效电阻为

$$R_{\text{eq}}=\frac{\sum_{n=1}^n I_{\max \text{F}}^2 R_{\text{F}}}{I_{\max }^{\prime 2}}\tag{1-19}$$

式中 $I_{\max \text{F}}$ ——线路各段最大电流；
 R_{F} ——线路各段导线电阻；
 R_{eq} ——线路等效电阻。

(7) 计算线路电能损耗 ΔW (kWh)，其计算式为

$$\Delta W=3 I_{\text{rms}}^{\prime 2} R_{\text{eq}} \times 24 \times 10^{-3}\tag{1-20}$$

5.0.4kV 低压配电线路的电能损耗计算

在工厂企业用电系统中，低压配电线路损耗的计算，是将容量相同的配电变压器供电的低压线路为一组，分别计算，其计算公式如下

$$\Delta W=\sum M N I_{\max }^2 R_{\text{P}} K_{\text{P}} F_{\text{P}} \times 24 \times 10^{-3}\tag{1-21}$$

$$F_{\text{P}}=\left(\frac{I_{\text{rms}}}{I_{\max }}\right)^2$$

式中 M ——相同相别、相同容量配电变压器台数；
 N ——接线系数，对于单相二线制 $N=2$ ，对三相四线制 $N=3.5$ ，对于三相三线制 $N=3$ ；
 $I_{\max }$ ——低压线路首端的最大电流，也就是变压器低压侧最大电流，A；
 R_{P} ——相同系数、相同容量变压器供电低压线路的电阻平均值， Ω ；
 K_{P} ——相同相别、相同容量变压器供电低压线路负荷分散因数平均值，见表 1-3；
 F_{P} ——相同相数、相同容量变压器供电低压线路的损耗因数平均值。

表 1-3 负 荷 分 散 因 数

序号	负荷分布状况	分散因数	序号	负荷分布状况	分散因数
1	末端集中负荷	1	4	负荷渐减分布	0.2
2	全线匀布负荷	0.33	5	负荷中间大两端渐减	0.38
3	负荷渐增分布	0.53			



在应用式 (1-21) 时, 还应注意以下两点:

(1) 负荷很轻的低压分支线路损耗可以忽略不计, 它的电阻不要统计在内。

(2) 如果某台变压器是向两侧供电, 线路电阻应除以 4; 如果是向三侧供电, 电阻值应除以 9; 如果向四侧供电, 电阻值应除以 16。

6. 接户线电能损耗计算

低压接户线的电能损耗占企业供电电网比例很少, 且接户线数量很多, 导线型号、长度及通过电流不同, 所以计算起来比较困难。因此, 通常对每 100m 低压接户线, 可按每月损耗 0.5kWh 电能来统计。

(二) 变压器电能损耗的计算

1. 总降压变电所主变压器电能损耗计算

变压器有功功率损耗可分为正比于变压器负荷二次方的绕组损耗和与所加电压有关的铁芯损耗 (即铁损) 两部分, 所以, 变压器铁芯日损耗电能 ΔW_{gd} (kWh) 为

$$\Delta W_{\text{gd}} = \Delta P_0 \times 24 \quad (1-22)$$

式中 ΔP_0 ——变压器的空载损耗, 或称铁损, kW。

变压器绕组损耗电能 ΔW_{kd} (kWh) 为

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{kd}} &= \Delta P_{\text{k}} \left(\frac{I_{\text{rms}}}{I_{\text{N}}} \right)^2 \times 24 \\ &= 3I_{\text{N}}^2 R_{\text{T}} \left(\frac{I_{\text{rms}}}{I_{\text{N}}} \right)^2 \times 24 \times 10^{-3} \\ &= 3I_{\text{rms}}^2 R_{\text{T}} \times 24 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (1-23)$$

式中 ΔP_{k} ——变压器的短路损耗, 或称铜损, kW;

R_{T} ——变压器一相等效电阻, Ω ;

I_{N} ——变压器的额定电流, A;

I_{rms} ——通过变压器的日均方根电流, A。

式 (1-23) 中, I_{N} 和 I_{rms} 必须是计算到同一电压侧的电流值。

主变压器日损耗电能为

$$\begin{aligned} \Delta W &= \Delta W_{\text{gd}} + \Delta W_{\text{kd}} \\ &= \Delta P_0 \times 24 + \Delta P_{\text{k}} \left(\frac{I_{\text{rms}}}{I_{\text{N}}} \right)^2 \times 24 \\ &= (\Delta P_0 + 3I_{\text{rms}}^2 R_{\text{T}} \times 10^{-3}) \times 24 \end{aligned} \quad (1-24)$$

当两台变压器并联运行时, 若已知两台变压器输入或输出的总电流, 则通过每台变压器的电流可用下式近似计算

$$\begin{aligned} I_{\text{rms}(1)} &= \frac{X_2}{X_1 + X_2} I_{\text{rms}} \\ I_{\text{rms}(2)} &= \frac{X_1}{X_1 + X_2} I_{\text{rms}} \end{aligned} \quad (1-25)$$

式中 X_1 、 X_2 ——两台并列变压器的各自电抗;

I_{rms} ——两台变压器的总均方根电流;

$I_{\text{rms}(1)}$ 、 $I_{\text{rms}(2)}$ ——两台并列变压器各自的均方根电流。

如果两台变压器的短路电压百分值相差不多, 可以近似地按照与容量成正比地分配总的方根电流。求得每台变压器的均方根电流后, 再进行每台变压器绕组的损耗总能的计算。

这里应当指出, 当企业供用电网络的电压水平低, 且与变压器工作的分接头电压相差较大时,

应考虑给变压器的铁芯损耗进行修正,其计算公式如下

$$\Delta P'_0 = \Delta P_0 \left(\frac{U}{U_f} \right)^2 \quad (1-26)$$

式中 U ——变压器所受的电源电压,即变压器的工作电压;

U_f ——变压器工作的分接头电压。

2. 配电变压器电能损耗计算

配电变压器电能损耗计算方法和主变压器一样,也是由固定损耗和可变损耗两部分组成,其计算方法如下:

日固定损耗电能

$$\Delta W_{gd} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{0i} \times 24 \quad (1-27)$$

日可变损耗电能

$$\Delta W_{kd} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ki} \left(\frac{I_{rmsi}}{I_{Ni}} \right)^2 \times 24 \quad (1-28)$$

配电变压器总日损耗电能为

$$\begin{aligned} \Delta W &= \Delta W_{gd} + \Delta W_{kd} \\ &= \sum_{i=1}^n \left[\Delta P_{0i} + \Delta P_{ki} \left(\frac{I_{maxi}}{I_{Ni}} \right)^2 F_p \right] \times 24 \end{aligned} \quad (1-29)$$

式中 ΔP_{0i} ——某台变压器空载损耗, kW;

ΔP_{ki} ——某台变压器短路损耗, kW;

I_{rmsi} ——某台变压器均方根电流, A;

I_{maxi} ——某台变压器实测最大电流, A;

I_{Ni} ——某台变压器一次侧额定电流, A;

F_p ——损耗因数。

三、降低供电损耗的措施

节约用电就必须降低线损,为了降低线损,首先必须做好企业供电技术管理和用电管理工作,不断提高电网的运行水平。同时,还必须采取一些技术措施来降低线损。主要降低线损技术措施分述如下。

(1) 对工厂企业电网进行升压改造,运行中适当提高电压。

线路和变压器功率损耗为

$$\Delta P = 3I^2R = \frac{S^2}{U^2}R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2}R \quad (1-30)$$

式中 P ——三相线路的有功功率;

Q ——三相线路的无功功率;

S ——三相线路的视在功率;

U ——电力网的线电压。

在负荷功率不变的情况下,将电网的电压提高,通过电网元件的电流减少,功率损耗也相应降低。在大型工厂企业中,将 35kV 电压降压变电所改为 110kV 电压总降压变电所,将厂区 10kV 的配电线路改为 35kV 的配电线路,其线路功率损耗可降低 90% 左右。同样,当输送同样的功率时,只要在线路和变压器等电气设备的绝缘允许条件下,适当提高运行电压,也可减少损耗。

如果电网的运行电压提高 $a\%$,由式 (1-30) 可知,电网中的功率损耗就可降低