

电力节能技术丛书

电能质量与节能技术

《电力节能技术丛书》编委会 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力节能技术丛书

电能质量与节能技术

《电力节能技术丛书》编委会 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内容提要

电力是经济社会发展的基础动力,电力在各项能源消耗领域中所占比重较大,电网企业在输电、配电、供电、用电等领域开展节能降耗工作,将对顺利实现“十一五”节能降耗指标产生重要作用。由江苏省电机工程学会组织编写的《电力节能技术丛书》,旨在希望各有关行业重视电力节能工作,积极探索节电的有效途径和研究推广切实可行的节能减排的技术手段。

《电力节能技术丛书》共包括6个分册,分别为电力节能政策与管理、火力发电厂节能技术、输变电系统节能技术、配电系统节能技术、用电系统节能技术、电能质量与节能技术。

本套《电力节能技术丛书》的作者和审稿人均为工作在科研、生产一线的专业技术人员,有丰富的理论基础和实践经验。

本书为《电能质量与节能技术》分册,包括:电能质量与节能;电能质量污染及其对节能的影响;电能质量检测及电能计量的影响;电能质量治理控制与节能效果;电能质量管理及其对节能降耗的作用。

本书可供电能质量、无功、线损类的工程技术人员以及电能质量专业技术管理和技术监督人员学习参考,也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电能质量与节能技术/《电力节能技术丛书》编委会编. —北京:中国电力出版社,2008

(电力节能技术丛书)

ISBN 978-7-5083-6691-3

I. 电… II. 电… III. ①电能-质量分析②电能-节能 IV. TM60 TM92

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第006973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)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008年4月第一版 2008年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9印张 212千字

印数 0001—3000册 定价 18.00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

《电力节能技术丛书》编委会

名 誉 主 任：费圣英

主 任：马苏龙

副 主 任：周光浩 叶惟辛 李顺宗

编委会成员：费圣英 马苏龙 周光浩 叶惟辛 范正满

巢大同 李顺宗 宋宏坤 陈国年 赵彩虹

李 群

丛 书 主 编：李顺宗

本册审稿人员：唐国庆

本册编写人员：李 群 蒋 平

电力是社会经济发展的基础动力。尽管我国近年来电力建设得到了快速发展,但我国电力发展存在五大“软肋”不容忽视:一是人均装机水平仍严重偏低;二是电网建设投资“欠账”;三是部分地区电力“吃紧”;四是电力发展质量“堪忧”;五是用电“结构之伤”。尽管我国已是世界电力生产的第二大国,但远远不是电力生产强国。我国人均能源拥有量和人均用电水平仍低于世界平均水平,而我国国民生产总值的单位能源消耗,却大大高于世界平均水平。能源浪费和环境污染已成为制约我国经济社会发展的重要因素。

钢铁、有色、电力、化工、建材等高耗能行业是我国节能减排的重点。而电力作为各行各业、千家万户广泛利用的二次能源,其节能降耗工作潜力巨大,前景广阔;同时也是促进电力工业发展、深化电力体制改革和提升电力管理水平的关键环节。我们把握电力这一商品所具有的“产、供、销同时完成”、“系统网络关联性强”等特性,有针对性地开展节能降耗工作,努力提高电能利用率。

电力节能降耗工作要做到“三全”,即全民参与、全方位开展和全过程管理。我们要加大节能降耗的宣传、教育和培训力度,强化全社会的节电意识和认识,着力构建资源节约型和环境友好型社会;我们要以提高电力能源利用效率为核心,坚持市场机制作用与宏观调控相结合,努力营造有利于节电降耗的体制环境、政策环境和市场环境,认真落实发、输、变、配、用电等各个地域的电能节约方案,以电力资源的高效利用促进社会经济的全面提升和可持续发展;我们要以加快技术进步为手段,在规划、建设、运行、检修、改造等全过程的每个环节,建立严格的科学管理制度,实行有效的激励政策,推进节能、挖潜、改造和技术创新工作的健康发展。

近年来,我国在电力节能降耗方面从专业的角度做了大量工作,取得了显著的成效和丰富的实践经验。江苏省电机工程学会在江苏省电力公司、江苏省电力试验研究院、南京供电公司、泰州供电公司、常州供电公司、东南大学、河海大学、南京师范大学、华能南通电厂等单位的大力支持下,组织数十位省内外的专家学者,编写了《电力节能技术丛书》。我们期望通过该套丛书的出版与宣传,能够对各电力企业的节能降耗工作起到积极的推动作用。

该丛书共分六册,分别从电力节能政策与管理、火力发电厂节能技术、输变电系统节能技术、配电系统节能技术、用电系统(主要是工业、农业、商业和照明等)节能技术、电能质量与节能技术六个方面,对节能政策、管理要求、

技术措施和节能方法等进行了有益的研究和探索。

时代在进步、技术在发展。随着电力工业的进步和发展，电力节能降耗同样也不断提出新的课题，我们要不断总结、加强交流、积极探索、勇于实践。我们相信，经过广大电力企业员工和工程技术人员共同努力，电力节能的新技术、新产品、新工艺将不断推广应用，我国科学发展、和谐建设，大力降低能耗，环境不断改善的又好又快的经济发展态势将不断涌现！

欣慰之余，是为序。

黄立英

前言



近年来,社会经济的发展使得电网规模不断扩大,电能质量问题也日益突出。一方面,各种非线性负荷及电力电子设备在电网负载中所占比例急剧增加,电能质量污染引起供电品质、供电可靠性下降,同时引起电能损耗增大;另一方面,技术的进步使公用电网、高科技型用户、精密负载等对供电可靠性、电能质量的要求越来越高。电能质量问题已日渐成为现代电网面临的一个必须认真对待并应寻求有效措施改善的技术焦点。

电力节能技术涉及诸多方面,电能质量是节能降损的一个重要影响因素。随着各类电能质量污染负荷的不断增加及因电能质量问题引起的能耗的不断上升,电能质量的治理和控制 在电力节能降损中的作用也日益显现。

本书结合近年来电能质量的工作实践,就电能质量领域的主要专业知识、电能质量对节能降损的影响、如何通过电能质量治理控制及管理来实现节能降损等作了阐述;涉及电能质量的概念、标准及其与节能的关系,电能质量污染源及其对节能降损的影响,电能质量检测及电能计量环节中互感器的影响,电能质量治理控制与节能效果分析,电能质量管理及其对节能降损的作用等;力求从电能质量涉及的多个方面,介绍电能质量工作、分析电能质量对节能降损的影响及指标改善对节能降损的作用与功效等。

本书的编写定位是:既能作为电能质量与节能降损工程技术的参考,也可作为相关工作的培训指导。

本书由江苏省电力试验研究院李群统稿。第一、二章由东南大学蒋平执笔,第三、四、五章由李群执笔。全书在编写过程中,得到了东南大学的顾伟博士、江苏省电力试验研究院的顾文、袁晓冬、王红星、王俊等同志的帮助。本书初稿完成后,东南大学的唐国庆教授进行了仔细审阅,并提出了不少宝贵意见和修改建议,在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中难免存在不足和缺点,恳请读者批评指正。

编者

2008年3月

目 录



序

前言

第一章 电能质量与节能	1
第一节 电能质量基本概念	2
第二节 电能质量与节能的关系	3
第三节 电能质量相关标准	12
第四节 电能质量及其对节能影响的研究领域	29
第二章 电能质量污染及其对节能的影响	33
第一节 电网侧电能质量污染源	33
第二节 用户侧电能质量污染源	38
第三节 电能质量污染的危害及其对节能的影响	48
第三章 电能质量检测及电能计量的影响	54
第一节 电能质量检测方法与手段	54
第二节 电能质量检测设备的功能要求	60
第三节 电能质量监测网	66
第四节 高压互感器对电能质量检测及节能降损的影响	74
第四章 电能质量治理控制与节能效果	81
第一节 常规谐波抑制与无功补偿技术	81
第二节 基于电力电子技术的电能质量控制	94
第三节 电厂侧自动电压控制技术	103
第四节 串联补偿技术	107
第五节 按频率、电压减负荷技术	110
第六节 电能质量控制的节能效果分析	111
第五章 电能质量管理及其对节能降损的作用	113
第一节 电能质量管理的职责与分工	113
第二节 电能质量管理的具体要求	117
第三节 电能质量检测管理	119
第四节 电能质量管理对节能降损的作用	121
附录 国家电网公司电网电能质量技术监督规定(试行)	126
参考文献	131

第一章

电能质量与节能

电能既是一种经济、清洁、实用且容易转换和控制的能源形态,又是一种电力部门向电力用户提供的由发、供、用三方面共同保证质量的特殊商品。如今,电能作为进入市场的商品,与其他商品一样,无疑应讲究质量。电能质量一直是人们关注的一个重要课题,尤其在电力市场兴起和发育之际,电能质量问题更为突出。电力公司为了赢得用户的青睐,抢占电力市场,就必须提供优质的、满足用户需求的电能。

对供电质量及其可靠性的要求日益提高是和用户的工艺过程水平的发展相联系的。近代科技进步促进了生产过程的自动化和智能化,对电能质量提出了更高更新的要求。一个计算中心失去电源 2s 就可能破坏几十小时的数据处理结果或造成上百万元的经济损失。在大型机器制造厂,0.1s 的电压暂降就可能造成异常的生产状况和质量破坏。当今自动化设备控制的连续精加工生产线对配电系统中的干扰异常敏感,几分之一秒的不正常供电就可能在工厂内部造成大规模的混乱,其损失是难以估计的。这些用户对不合格电力的容许度可严格到只有 1~2 个周。现代化的贸易中心、银行、医院也是如此。谐波的严重危害和所造成的损失也经常被人们所提及,而无人值班变电站中计算机系统突然出现的死机现象,多属于电能质量问题。

从技术角度讲,提供优质电能是由发、供、用电三方共同保证的,因此,对电能质量日益关注的原因是多方面的,共可归纳为五点:

(1) 现代用电设备对电能质量的要求比传统设备更高。许多新的电器和装置都带有基于微处理机的控制器和功率电子器件,它们对各种电磁干扰都极为敏感。

(2) 对提高的电力系统运行总效率的重视程度不断加强,特别在用电设备方面表现突出。例如高效率电动机变速驱动、为降低损耗和校正功率因数而采用的并联电容补偿器。但这些设备的使用会导致电网谐波污染(更广义的称为电气环境污染),致使供电电压干扰水平加重,给电力系统安全运行带来直接的或潜在的危害。

(3) 电力用户已提高了对电能质量的认识,正在了解如供电间断、电压凹陷、电路通断引起的暂态现象等实际问题。为满足高效生产流程的需要,维护用电设备的正常运行,越来越多的用户向电力部门提出了高质量供电的要求,甚至通过签订供电合同和质量协议的方式以获得保证。

(4) 电力网的各部分都是相互联系的,因此,综合协调处理至关重要。任何一个局部的故障或事件都有可能造成大面积的影响,甚至是重大损失。这迫使供电部门在保证向用户提供优质电力的同时,还需极力避免因用户设备生产的电力干扰,维护电网安全运行。因此,电能质量已经成为一项系统工程问题。

(5) 电网电能质量的恶化带来了很多问题,诸如变电所因谐波引起的保护装置异常发生及误动,表计指标异常,继电保护调试困难,主变压器发出异常声音,电机烧损,电能计量误差过大等严重威胁电网及用电设备的安全经济运行。谐波功率的损失也是一个不容忽视的问题,它加剧了电网线损,并减少了系统设备的使用寿命,增加了供电成本。例如对某

35kV 变电所的谐波损失功率进行初步估计, 年谐波损失电量大约在 27 万 kWh。

综上所述, 现代电网与负荷构成出现的变化是工业生产不断发展的必然结果, 这有利于电力用户提高生产率并获得更大的经济效益。同时, 采用高效电力负荷设备可大量节约能源, 延缓用电需求, 从而节省电力建设所需的大量投资。因此, 提高供电质量, 满足生产发展的需求已经成为供用双方共同的愿望。深入分析和研究电能质量问题, 探询在一定条件下电磁干扰的因果关系, 明确责任和义务, 是电力工业适应市场竞争和可持续发展所必须的。

从市场经济和商品质量这个普遍意义上讲, 了解电能质量, 改善电能质量是必不可少的, 是保证电力系统安全 (包括用户设备的用电安全)、稳定、经济运行的必要条件, 是电网运行水平高低的重要标志, 同时也是电力企业用电管理水平考核的重要标志。改善电能质量是提高国民经济总体效益、用电效益 (节能、降损) 和改善电气环境以及工业生产可持续发展的技术保证, 是面向电力市场, 适应竞争机制强有力的手段。通过建立和健全电能质量的全面管理, 保证各行各业的正常用电秩序, 为千家万户提供安全可靠的电能。

在我国, 虽然总体经济和技术水平还比较落后, 但在部分经济发达地区电能质量问题的影响已经比较突出。而且, 由于多种原因, 在供电可靠性和电网电压幅度的稳定水平等指标上, 我国的情况尤其落后。如何保证电能质量, 同时提高节能水平, 已成为国内外电工领域迫切需要解决的重要课题之一。

第一节 电能质量基本概念

理想的电力系统应以恒定的频率 (50Hz) 和正弦波形按规定的电压水平 (标称电压) 对用户供电。在三相交流电力系统中, 各相的电压和电流应处于幅值大小相等、相位互差 120° 的对称状态。由于系统各元件 (发电机、变压器、线路等) 参数并不是理想线性或对称的, 负荷性质各异且随机变化, 加之调控手段的不完善以及运行操作、外来干扰和各种故障等原因, 这种理想状态在实际当中并不存在, 而由此产生了电网运行、电气设备和用电中的各种各样的问题, 也就产生了电能质量 (Power Quality) 的概念。

从普遍意义上讲, 电能质量是指优质供电。但迄今为止, 对电能质量的技术含义还存在着不同的认识, 这一方面是由于人们看问题的角度不同, 如电力企业可能把电能质量简单地看成是电压 (偏差) 与频率 (偏差) 的合格率, 并且用统计数字来说明电力系统电能 99% 是符合质量要求的; 电力用户则可能把电能质量笼统地看成是否向负荷正常供电; 而设备制造厂家则认为合格的电能质量就是指电源特性完全满足电气设备正常设计工况的需要, 但实际上不同厂家和不同设备对电源特性的要求可能相去甚远。另一方面, 对电能质量的认识也受电力系统发展水平的制约, 特别是用电负荷的性能和结构。

关于什么是电能质量的问题, 在这一研究领域的许多文献和报告中使用过的相关术语如下:

(1) 电压质量 (Voltage Quality)。即用实际电压与理想电压间的偏差 (应理解为广义偏差, 即包含幅值, 波形、相位等), 反映供电企业向用户供给的电力是否合格。此定义虽然能包括大多数电能质量问题, 但不能 (或不宜) 将频率造成的质量问题包含在内, 同时不含用电 (电流) 对质量的影响。

(2) 电流质量 (Current Quality)。即对用户取用电流提出恒定频率、正弦波形要求,

并使电流波形与供电电压同相位,以保证系统以高功率因数运行。这个定义有助于电网电能质量的改善,并降低线损,但不能概括大多数因电压原因造成的质量问题,而后者往往并不总是由用电造成的。

(3) 供电质量 (Quality of Supply)。应包含技术含义和非技术含义两部分:技术含义有电压质量和供电可靠性;非技术含义是指服务质量 (Quality of Service),包括供电企业对用户投诉与抱怨的反应速度和电力价格 (合理性、透明度) 等。

(4) 用电质量 (Quality of Consumption)。应包括电流质量和非技术含义,如用户是否按时、如数缴纳电费等,它反映供用双方相互作用与影响中用电方的责任和义务。

须指出,在电工学中,“Power”(电力、电功率等)的含义是指能量传输的速率,它与电压和电流的乘积成正比,因此不可能定义这一物理量的质量概念。实际上,供电系统只能控制电压,而不能控制某一负载汲取电流。当然,系统在实际运行时,电压与电流之间总是存在着紧密联系,尽管发电机提供了几乎正弦的电压,但通过系统阻抗的电流可能造成对公共连接点 (PCC) 电压的扰动。此外,系统的运行操作、故障和雷击等也是电压扰动的原因。从这方面讲,“Power Quality”不宜使用“电力质量”译名,宜译为“电能质量”。

IEEE 技术协调委员会已正式采用“Power Quality”这一术语,并且给出了相应的技术定义。“合格电能质量的概念是指给敏感设备提供的电力和设置的接地系统是均适合于该设备正常工作的。”这个定义的缺点是不够直接和简明。有些参考文献中同时提到了电能质量的另一种定义:“导致用户设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率偏差。”这个定义较简明,也概括了电能质量问题的成因和后果,但似乎将“用户设备”改为“用电设备”更全面一些。当然这里的“偏差”应广义理解,甚至应包括供电可靠性。

第二节 电能质量与节能的关系

电力工业作为国民经济的基础产业和主要能源行业,是资金密集的装置型产业,同时也是资源密集型产业。无论电源和电网,在建设和生产运营中都需要占用和消费大量资源,包括土地、水资源、环境容量以及煤炭、石油、燃气等各类能源。当前,我国火力发电及供热用煤占全国煤炭总产量的 51%,产生灰渣约占全国 70%,火电用水量占工业用水总量 40%,烟尘排放占工业排放 33%,二氧化硫排放占工业排放 56%。因此,电力工业节能在我国资源节约工作中占有重要地位。

我国经济发展处于工业化中期,进入了重化工业阶段,能源消费进入了新的结构升级阶段,电力需求呈不断增长趋势,因此对能源的依赖程度要比发达国家大得多。当前,在加快电力建设的同时,一方面以煤炭、水等为突出矛盾的资源供给能力不足,已成为电力发展的资源制约因素,并直接影响到国民经济的增长;另一方面,我国当前电力结构不尽合理,技术管理水平有待进一步提高,发展尚未走出高投入、高成本、低效益的传统增长方式,进一步加剧了我国资源短缺局面,企业的生产经营与长远发展都受到很大影响。

与世界主要工业国家相比,我国电力工业能源节约仍有比较大的潜力。

(1) 供电煤耗与世界先进水平仍然相差约 50g/kWh。也就是说,如果按世界先进水平供电煤耗及目前我国发电量计算,我国一年要多耗标准煤约 1 亿 t。2005 年,中国电力工业全国平均供电煤耗为 374g/kWh (2007 年已降低为 354g/kWh),生产厂用电率为 5.95%,

电网综合线损率为 7.18%，与国外先进水平相比差距甚大。如日本东京电力公司 1999 年的供电煤耗为 320g/kWh，厂用电率为 4%；法国电力公司 1999 年的供电煤耗为 331.6 g/kWh，厂用电率为 4.47%；德国巴伐利亚电力公司 1999 年的供电煤耗为 332.1g/kWh，厂用电率为 5.42%（含脱硫装置用电）。美国、日本和德国 2000 年的电网综合线损率分别为 6.0%、3.89%、4.6%，意大利 EVEL 2004 年的综合线损率为 3.0%。

(2) 输电线损率比国际先进电力公司高 2.0%~2.5%。相当于一年多损耗电量 350 亿 kWh，大体相当于我国中部地区一个省一年的用电量。

(3) 火电厂平均装机耗水率比国际先进水平高 40%~50%。相当于一年多耗水 15 亿 m³。

(4) 发电能源结构不合理。按发电量计算，目前燃煤发电占将近 80%，水电等可再生能源比重较低，而且近年来比重不断下降，2003 年占发电量的比例为 14.77%，比 1983 年的 24.57% 降低 9.8%。供热机组的容量比例与世界先进水平相比仍然较低，2003 年在我国 6 万 kW 及以上火电机组中，供热机组总装机容量为 4209.21 万 kW，占火电机组总容量的 14.5%，比重低于供热系统先进国家。

(5) 大机组的比重过小。2003 年，全国 6000kW 及以上的火电机组有 4959 台，总容量为 27849.83 万 kW，平均机组容量为 5.62 万 kW；30 万 kW 及以上机组有 339 台，总容量为 11994 万 kW，占总容量的 43.1%。发电设备技术参数相对落后，在全国火电机组中，亚临界及以上参数机组占 43%，高压、超高压参数机组占 42%，中、低压参数机组占 15%；超临界机组只占火电总装机容量的 2.2%，而美国、日本、俄罗斯等国家已占 50% 以上。燃气—蒸汽联合循环机组的比例过低，仅占火电总装机容量的 2.3%；整体煤气化联合循环 (IGCC)、增压循环流化床 (PFBC)、大型循环流化床 (CFBC) 等洁净煤技术仍在发展过程中；新能源、可再生能源发电技术及设备水平尚需提高。

(6) 电网的网架结构仍然比较薄弱。超高压输电线路比重偏低，变电站的站点布局不足，电压等级不合理，高损耗变压器在部分地区仍占有相当大的比例，部分电网中无功补偿设备的容量不足导致电网的电压质量下降，功率因数降低而使供电能力受限，线路损耗加大。

(7) 电力需求侧管理还有巨大的潜力。当前其主要侧重于对用电需求进行削峰填谷，而在提高电能利用率、提高终端用电效率等方面的作用尚有待进一步发挥。

(8) 节能技术进步和节能管理水平有待提高。①对节能的认识存在不足。存在偏重增量发展，轻视存量节约；偏重节能工作的局部经济效益，轻视社会和资源可持续利用的全局、综合效益；电力规划、建设、生产和使用全过程发展不平衡。②缺少配套的法规政策，尤其是节能优惠政策难以得到有效落实。③电力节能体制和机制不健全，对电力节能缺乏有效的行业管理、监督和服务。④新的节能改造技术，特别是适应大机组特性的技术进展不大。⑤当前还存在小机组继续建设、电力用煤质量普遍下降等问题，对机组的安全性、可靠性和经济性造成很大影响。

电网中电能质量污染源大量涌现，电能质量问题日趋复杂，因此这方面课题也越来越受到研究者的重视。电能质量问题的产生与近年来非线性设备的大量采用有很大关系，另外，广泛应用的传统变压器和铁芯电抗器也会产生电能质量问题。国外经验表明，各种非线性电力设备容量的增长率超过电网的发电设备容量的增长率，这一事实说明电能质量问题将更加

突出。电能质量问题的存在会影响整个电网环境,对电力设备造成不利影响。国内外运行经验表明,受各种电能质量问题影响而导致损坏的电气设备中,节能器件占有最大比例。因此,有必要了解电能质量问题对节能器件寿命的影响。

近几年来许多厂矿企业大量使用晶闸管整流和换流、电弧炉、中频炉、单晶炉等谐波干扰源负荷设备,这些设备在吸收大量无功功率,使用户的功率因数降低的同时,也使谐波电能损耗日益增加,严重降低了电能的使用效率。我国颁布的 GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》的国家标准,对各级公用电网的谐波电压和用户注入电网的谐波电流均作出了明确的规定。电力工业部颁发的《电网电能质量技术监督管理的规定》中第五条指出:“因电网或用户用电原因引起的电能质量不符合国家标准时,按‘谁干扰,谁污染,谁治理’的原则及时处理,并贯穿于电网及用电设施设计、建设和生产的全过程。”因此,滤除谐波、提高功率因数、减小谐波电能损耗、提高用电效率、延长设备寿命是这类企业节能降耗、提高生产效益和产品质量的当务之急。

总的来说,随着电网电能质量污染的日益严重,各种电能质量治理措施提上日程,它们对系统的节能降耗又起到了积极的作用。同时,电力市场化使得节能技术日益受到关注,而近年来电力电子技术的进步也带动节能技术不断发展,在电网中大量应用的节能设备大都使用了现代电力电子技术,将不可避免地电网电能质量产生一定的影响。因此,有必要对电能质量和节能之间的关系进行研究,以便更好地解决各相关问题。

电能质量与节能的关系可以从两个方面来论述,一是控制电网电能质量会带来节能效益,二是节能技术对电网电能质量也有影响。

一、电能质量控制的节能效益

各种控制电能质量的措施中,会带来节能效益的有两种:谐波抑制技术和无功补偿技术。

谐波除了会造成电网污染外,还会产生谐波功率,在电网和电气设备上造成附加损耗,带来能源浪费。采用相应措施消除谐波是电网节能措施的一个重要方面。

电网异地无功输送不但会在线路上产生大量的能源损耗和浪费,而且会导致受端的电压质量变差。因此,电力公司通常以就地补偿为原则,并辅以现代最优化技术,来实现电网无功优化控制。这样使得电网运行于较高的功率因数,保证了较好的输电、供电质量,也实现了能源的节约。

(一) 谐波治理带来的节能效益

工业的发展使得越来越多的电力电子设备以及非线性负荷在电网中获得应用,这也使得谐波污染问题更加凸显出来。谐波除了会造成电网污染和危害电力系统正常运行外,还会带来大量谐波功率损耗,浪费能源,并危害各种节电设备。

1. 谐波会引起电网附加损耗

谐波电流在电网中的流动将在线路上产生有功损耗,它是线路网损的一部分

$$\Delta P_L = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (1-1)$$

一般来说,谐波电流与基波电流相比所占比重不大,但谐波频率高,导线的集肤效应使谐波电阻增加很多,因此由谐波产生的附加损耗也大。

对于采用电缆的输电系统,谐波除了引起附加损耗外,还可能使电压波形出现尖峰,从

而加速电缆绝缘的老化,使介质损耗增加及温升增高,从而缩短电缆的使用寿命。通常电缆的额定电压越高,谐波对电缆的危害也越大。电缆的分布电容对谐波电流有放大作用,会使上述危害更为严重。

对于架空线路来说,电晕的产生与电压峰值有关。尽管基波电压可能没有超过规定值,但由于谐波的存在,其电压峰值可能超过允许值而产生电晕。

谐波对电网的危害除造成线路损耗外,更重要的是使电网电压波形受到污染,供电质量下降,从而危及各种用电设备的正常运行。

2. 谐波会引起旋转电机和变压器附加损耗

谐波对旋转电机和变压器的影响主要是引起附加损耗和过热,其次是产生机械振动、噪声和谐波过电压。这些将缩短电机的寿命,严重时甚至会损坏电机。曾经有过这样的例子,某工厂的电动机运行一直正常,但一段时间以来却连续出现损坏。经查,原来是接于同一电网的邻近工厂新投入了大型整流装置,因未采取消除谐波的措施,其谐波电流流入该厂而使电动机连续损坏。

谐波电压或谐波电流在定子绕组、转子回路及定子与转子的铁芯中产生附加损耗,这是频率升高而使集肤效应、磁滞及涡流等引起的损耗增加所致。谐波电流在定子和转子绕组端部建立的漏磁场将产生额外的损耗。反映谐波附加损耗的谐波电阻 R_n 和反映基波损耗的工频电阻 R_1 之比大于 1,一般用以下近似比值

$$R_n/R_1 \approx \sqrt{n} \quad (1-2)$$

由于在多数母线上都接有大量电动机,而电动机的出力一般不能按发热情况进行调整,因而电动机允许承受谐波的条件宜按谐波电压而不是按单台电动机的谐波电流来考虑。

考虑谐波引起的电动机发热效应时,可把它承受的谐波电压折算成等值的基波负序电压 $U_{1(2)eq}$,折算分式如下

$$U_{1(2)eq} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{n^m} \right)^2} \quad (1-3)$$

其中,系数 $m \leq 1$ (可取 0.75~1)。

当基波负序电压 $U_{1(2)}$ 和谐波电压 U_n 同时存在时,式 (1-3) 可改为

$$U_{1(2)eq} = \sqrt{U_{1(2)}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{n^m} \right)^2} \quad (1-4)$$

在持续和短时工作条件下,电动机承受负序电压值分别以不超过额定电压的 2% 和 3% 为宜。

同样也可将谐波电流折算成等值的基波负序电流

$$I_{1(2)eq} = \sqrt{I_{1(2)}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (1-5)$$

除谐波引起的损耗外,谐波引起的机械振动对电动机也有很大的危害。

谐波源产生的谐波电流流入变压器时,主要影响是增加了变压器的铜损耗和铁损耗。随着谐波频率的增高,集肤效应更加严重,铁损耗也更大。因此,高次谐波分量比低次谐波分量更容易引起变压器的发热。谐波电流还会引起变压器外壳、外层硅钢片和某些紧固件的发热,并有可能引起变压器局部严重过热。此外,谐波还会引起变压器的噪声增大。

从上述介绍可知,谐波会在电网和各种电气设备(旋转电机、变压器等)上造成大量谐波功率损耗,高次谐波分量比低次谐波分量更容易引起损耗(但电网中高次谐波含量一般远低于低次谐波,谐波损耗主要还是由低次谐波引起)。因此,采用各种谐波治理措施消除公用电网谐波,可以有效降低谐波功率损耗,带来重大节能效益。

3. 谐波对电力设备的危害

(1) 随着非线性电力设备的广泛应用,电力系统中谐波问题日趋严重,谐波的存在会对电力设备造成损坏,加速绝缘老化。

(2) 谐波叠加后的电压峰值对节电器件老化有很大的影响,研究表明,谐波对其寿命的主要影响因素为:电压峰值、电压均方根值和电压波斜率。其中峰值对它寿命的影响最大。

(3) 作为并联成套装置的节电设备,都是在谐波干扰下运行的,主要影响如下:

1) 畸变的电压波形使节电器件局部性能下降。由于谐波的存在,电压波形发生畸变,使电压峰值增高,呈锯齿状尖顶波。

一些试验表明,尖顶波电压易在器件中诱发局部放电,而且因电压变化速率快,引起的局部放电强度也较大,这将对绝缘介质的老化起加速作用。

器件的局部放电性能一般可用起始放电场强与局放熄灭场强两个参数来表征,若局放熄灭场强低于工作场强,那么由于操作过电压所诱发的局部放电就可能在正常工作场强下不能熄灭,而形成长时间的局部放电。

试验表明,当电源电压含有谐波时,器件的局部放电起始电压和熄灭电压均相应下降,而且当谐波含量较大时,谐波次数越高,下降幅值越大。

虽然自愈式并联器件国标中对局部放电性能未作明确要求,但是局部放电对绝缘介质的影响是客观存在的,长时间的局部放电,必然加速绝缘介质的老化,使其自愈性能恶化,最终导致设备损坏。

2) 严重的谐波过电流使节电器件损耗功率增加,导致异常发热。在相关标准中,允许通过的稳态过电流,应不超过在额定频率、额定正弦电压下产生的电流的1.3倍,这个稳态过电流是谐波和过电压共同作用的结果。因此,在如此大的损耗功率下,器件将异常发热,必然使其绝缘迅速老化而早期损坏。

因此,抑制谐波对节电设备寿命的影响十分重要。

(二) 无功补偿措施带来的节能效益

功率因数是供用电系统的一项重要技术经济指标,用电设备在消耗有功功率的同时,还需大量的无功功率由电源送往负荷,功率因数反映的是用电设备在消耗一定的有功功率的同时所需的无功功率。对于农村用电负荷来说,主要是一些小加工业及照明负荷,其中大部分用电设备为感性负载,其功率因数都很低,影响了线路及配电变压器的经济运行。通过合理配置无功功率补偿设备来提高系统的功率因数,从而达到节约电能、降低损耗的目的。

假设电网输送的有功 P 为定值,加装无功补偿设备后功率因数由 $\cos\varphi_1$ 提高到 $\cos\varphi_2$,因为 $P=UI\cos\varphi$,负荷电流 I 与 $\cos\varphi$ 成反比,又由于 $P=I^2R$,线路的有功损失与电流 I 的平方成正比。当 $\cos\varphi$ 升高,电流 I 降低时,线路有功损耗大大降低

$$\Delta P_1 = I_1^2 R \quad (1-6)$$

$$\Delta P_2 = I_2^2 R \quad (1-7)$$

$$P = UI_1 \cos\varphi_1 = UI_2 \cos\varphi_2 \quad (1-8)$$



有功损耗减少量

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 = (I_1^2 - I_2^2)R \quad (1-9)$$

由式 (1-8) 得 $I_2 = I_1 (\cos \varphi_1 / \cos \varphi_2)$, 代入式 (1-9)

$$\Delta P = [1 - (\cos \varphi_1 / \cos \varphi_2)^2] I_1^2 R = [1 - (\cos \varphi_1 / \cos \varphi_2)^2] \Delta P_1 \times 100\% \quad (1-10)$$

式中 $\cos \varphi_1$ ——补偿前的功率因数;

$\cos \varphi_2$ ——补偿后的功率因数;

I_1 ——补偿前的线路电流;

I_2 ——补偿后的线路电流;

ΔP_1 ——补偿前的有功损耗;

ΔP_2 ——补偿后的有功损耗;

ΔP ——补偿后有功损耗减少量。

由表 1-1 可以看出, 在输送同样的功率时, 由于功率因数不同, 在电网中造成的有功损耗大不相同。从发电厂到用户, 往往经过较长距离的供电线路, 并经多次变压, 功率损耗约占总耗电量的 8%, 因而节电效果极其显著。这不仅使企业本身受益, 更重要的是能为国家节约宝贵的电能, 创造出比它本身价值高几十倍甚至上百倍的工业产值, 宏观效果更加可观。

例如: 某条 35kV 线路功率因数为 0.6, 如提高到 0.85, 线路损失可降低 $P\% = [1 - (0.6/0.85)^2] \times 100\% = 50\%$; 反之, 当功率因数从 0.85 降到 0.6 时, 线路损失将增加 $P\% = [(0.85/0.6)^2 - 1] \times 100\% = 101\%$ 。

表 1-1

提高功率因数与减少有功损耗的百分比关系

$\cos \varphi_1 \backslash \cos \varphi_2$	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.60	44	50	56	60	64
0.65	34	42	48	53	58
0.70	23	32	40	46	51
0.75	12	22	31	38	44
0.80	0	11	21	29	36
0.85		0	11	20	28
0.90			0	10	19
0.95				0	10

世界发达国家 (如美国、英国、日本等) 规定配电线路上基本不送无功功率, 输电线路的功率因数在高峰负荷时达 0.95 以上, 在低谷时为 1.0 左右。我国各地区电力网的平均功率因数较低, 具有很大的降损潜力。

二、节能技术对电能质量的影响

节能技术对电能质量的影响主要体现在两方面, 一是各种节能设备的使用有可能恶化电网电能质量, 二是各种扩展节能技术的使用也会导致电能质量变差, 如并联电容补偿装置参数配置不合理引起的电网谐振、分布式发电技术也会引起电网电压和电流的畸变。

目前得到广泛应用的节能设备有节能灯具、高效率空调和热泵、高效率电动机、高效率烘干机等, 它们都使用了电子开关技术。

(一) 节能设备对电能质量的影响

我国照明耗电大约占全国总发电量的 10%~20%, 耗电量是三峡水力发电工程全年发电能力 (840 亿 kWh) 的 3 倍左右。如果全国的白炽灯都换成节能的绿色照明灯具, 我国一年可节电数百亿 kWh。因此, 选择和使用高效节能的照明产品是节省照明用电的重要途径。

荧光灯是目前应用范围最广泛的节能照明光源,家用节能灯主要采用直管型、环型、紧凑型等荧光灯。用紧凑型荧光灯取代白炽灯,可节电 70%~80%,使用寿命延长 5~10 倍。

但是最近的研究表明,大量安装的紧凑型荧光灯会引起用户侧供电电压畸变。针对一个的配电系统进行研究,以紧凑型荧光灯取代白炽灯进行照明(取代原则是把 100W 和 75W 的白炽灯泡分别用 23W 和 20W 的紧凑型荧光灯泡代替,而两者差额负荷认为是线性负荷),考虑了三个不同的负荷水平,分别监测系统各母线的电压总畸变率 THD_u , 所得结果见表 1-2。

表 1-2 三个不同负荷场景下系统各母线电压的 THD_u

节点	第一个场景: 总负荷 9kW (30%)			第二个场景: 总负荷 18kW (60%)			第三个场景: 总负荷 27kW (90%)		
	白炽灯	紧凑型 荧光灯	差别	白炽灯	紧凑型 荧光灯	差别	白炽灯	紧凑型 荧光灯	差别
	$THD(\%)$	$THD(\%)$	%	$THD(\%)$	$THD(\%)$	%	$THD(\%)$	$THD(\%)$	%
1T	3.255	3.980	0.725	3.254	6.119	2.865	3.253	8.850	5.597
1S	3.261	3.400	0.139	3.264	5.274	2.010	3.267	7.936	4.669
1R	3.250	5.742	2.492	3.247	8.053	4.806	3.245	10.780	7.535
2T	3.255	4.020	0.765	3.255	6.207	2.952	3.255	9.009	5.754
2S	3.261	3.432	0.171	3.266	5.383	2.117	3.269	8.109	4.840
2R	3.250	5.776	2.526	3.248	8.117	4.869	3.246	10.880	7.634
3T	3.255	4.372	1.117	3.254	6.863	3.609	3.253	10.020	6.767
3S	3.261	4.397	1.136	3.264	8.142	4.878	3.266	12.480	9.214
3R	3.250	6.553	3.303	3.247	9.472	6.225	3.245	12.920	9.675
4T	3.255	4.630	1.375	3.254	7.728	4.474	3.253	11.910	8.657
4S	3.261	3.449	0.188	3.265	5.496	2.231	3.269	8.306	5.037
4R	3.251	5.860	2.609	3.248	8.287	5.039	3.247	11.130	7.883
5T	3.257	4.622	1.365	3.259	7.191	3.932	3.260	10.530	7.270
5S	3.272	5.285	2.013	3.287	10.420	7.133	3.300	16.030	12.730
5R	3.256	7.110	3.854	3.259	10.510	7.251	3.263	14.500	11.237
6T	3.255	4.391	1.136	3.255	6.919	3.664	3.254	10.110	6.856
6S	3.261	4.422	1.161	3.264	8.175	4.911	3.267	12.540	9.273
6R	3.250	6.570	3.320	3.248	9.505	6.257	3.246	12.970	9.724
7T	3.254	4.709	1.455	3.253	7.896	4.643	3.252	12.150	8.898
7S	3.261	3.463	0.202	3.265	5.571	2.306	3.268	8.432	5.164
7R	3.251	5.909	2.658	3.248	8.385	5.137	3.247	11.280	8.033
8T	3.257	4.706	1.449	3.259	7.260	4.001	3.260	10.650	7.390
8S	3.272	5.939	2.667	3.286	12.040	8.754	3.298	18.500	15.202
8R	3.256	7.444	4.188	3.259	11.100	7.841	3.262	15.410	12.148
9T	3.259	4.755	1.496	3.261	7.429	4.168	3.264	10.890	7.626
9S	3.273	5.345	2.072	3.288	10.550	7.262	3.302	16.220	12.918
9R	3.257	7.232	3.975	3.261	10.720	7.459	3.266	14.820	11.554
10T	3.254	5.667	2.413	3.252	10.190	6.938	3.250	16.580	13.330
11T	3.257	4.706	1.449	3.259	7.260	4.001	3.260	10.650	7.390
11S	3.271	6.844	3.573	3.284	14.240	10.956	3.296	21.870	18.574
11R	3.255	7.801	4.546	3.258	11.770	8.512	3.261	16.450	13.189
12T	3.258	4.752	1.494	3.259	7.298	4.039	3.261	10.710	7.449
12S	3.272	5.965	2.693	3.287	12.090	8.803	3.299	18.580	15.281
12R	3.256	7.485	4.229	3.259	11.180	7.921	3.263	15.530	12.267
13T	3.253	6.205	2.952	3.251	11.320	8.069	3.249	18.970	15.721
14T	3.254	6.038	2.784	3.252	11.080	7.828	3.250	18.020	14.770
15S	3.271	7.513	4.242	3.283	15.830	12.547	3.294	24.310	21.016
16R	3.257	7.979	4.722	3.262	12.100	8.838	3.267	16.980	13.713
17S	3.269	8.875	5.606	3.281	19.120	15.839	3.291	29.360	26.069
18S	3.272	7.612	4.340	3.285	16.050	12.765	3.297	24.660	21.363
19S	3.267	10.150	6.883	3.276	22.190	18.914	3.284	34.070	30.786
20S	3.269	9.383	6.114	3.280	20.290	17.010	3.290	31.150	27.860
最小值	3.250	3.400	0.139	3.247	5.274	2.010	3.245	7.936	4.669
最大值	3.273	10.150	6.883	3.288	22.190	18.914	3.302	34.070	30.786

注 表 1-2 中用阴影标出了电压总畸变率大于 8% 的节点。