

电力需求侧管理系列丛书

国家发展和改革委员会
电力需求侧管理培训推荐用书

通用节能技术

国家发展改革委经济运行调节局
国家电网公司营销部
南方电网公司市场营销部

编

DSM



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TM7
101

通用节能技术

国家发展改革委经济运行调节局
国家电网公司营销部
南方电网公司市场营销部

编

DSM



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《电力需求侧管理系列丛书》是国家发展和改革委员会开展电力需求侧管理培训工作的推荐用书,丛书共13个分册,涵盖电力需求侧管理工作的管理、技术、工具三个层面。本书是其中的《通用节能技术》分册。具体介绍了供配电节能技术、绿色照明技术、暖通空调系统节能技术、建筑围护结构节能技术、工业余热余压利用技术、工业锅炉(炉窑)节能技术等内容。

本丛书可供各地政府主管部门、电网企业、能源服务机构、电力用户相关人员阅读、使用。

图书在版编目(CIP)数据

通用节能技术 / 国家发展改革委经济运行调节局, 国家电网公司营销部, 南方电网公司市场营销部编. —北京: 中国电力出版社, 2013.9

(电力需求侧管理系列丛书)

ISBN 978-7-5123-4791-5

I. ①通… II. ①国… ②国… ③南… III. ①电力系统—节能—技术培训—教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 179480 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

*

2013 年 9 月第一版 2013 年 9 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 8.5 印张 123 千字

印数 0001—3000 册 定价 21.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

《电力需求侧管理系列丛书》编委会

主 任 鲁俊岭

副主任 徐阿元 吴建宏 王 勤 胡兆光

编 委 (按姓氏笔画排序)

马丽华	王玉萍	王成强	王 林	王宗义	王海龙
王海波	王 榕	王德亮	王 鑫	韦加雄	卞忠庆
左松林	田永军	史景坚	冯小维	朱 炯	朱 清
乔 昆	任 泽	华普校	刘学军	刘宪明	刘继东
关长祥	江 峰	孙红光	李开明	李永宁	李 郁
李绍祥	李洪宾	李家才	李惊涛	杨仁泽	杨锦辉
何 胜	汪穗峰	张庆云	张兴华	张 军	张志飞
张 波	张南娇	张艳红	张继刚	张 磊	陈少江
陈 军	陈 枫	范继臣	林世良	金必煌	金国生
周新民	郑建平	赵小平	赵青山	胡占廷	钟树海
段学民	姜林福	羿宗胤	夏云飞	夏 鑫	顾国栋
徐 兵	徐 磊	卿三红	郭炳庆	朗 琼	陶时伟
黄永斌	黄志明	黄惠英	梅学民	曹念忠	崔海山
董 新	舒旭辉	路民辉	詹 昕	廉国海	颜庆国
薛建虎	檀跃亭	魏宏俊			

《电力需求侧管理系列丛书》编写组

组 长 陈江华

副组长 周 珏 徐杰彦

编写人员 (按姓氏笔画排序)

丁 胜	王振宇	王 鹤	尹玉霞	吕晓剑
闫华光	吴亚楠	吴在军	李玉琦	李 军
李铁男	李涛永	李德智	邱泽晶	张小松
陈 磊	苗常海	周伏秋	周 莉	周 晖
单葆国	钮文洁	黄学良	曹 荣	蒋利民
谭显东	Wolfgang Eichhammer			

前言

为深入开展电力需求侧管理工作，增强全社会科学用电、节约用电、有序用电的意识，提高从业人员电力需求侧管理业务水平，国家发展和改革委员会经济运行调节局会同国家电网公司营销部、南方电网公司市场营销部组织有关单位和专家编写出版了《电力需求侧管理系列丛书》。

本丛书共 13 个分册，涵盖电力需求侧管理工作的管理、技术、工具三个层面。其中，管理层面有《中国节约能源法规与政策解析》《综合资源规划与资源选择》等分册；技术层面有《能效电厂理论与实践》《负荷特性及优化》《重点用能行业节能技术》《能源审计》《通用节能技术》《分布式能源与热电冷联产》《空调与热泵技术》《电机系统节能技术》《电蓄冷蓄热技术及技术经济评估》等分册；工具层面有《节能量和节约电力测量与核证》《欧盟能效指令与白色证书》等分册。

本丛书是国家发展和改革委员会开展电力需求侧管理培训工作的推荐用书，可供各地政府主管部门、电网企业、能源服务机构、电力用户相关人员阅读、使用。

丛书的编写得到了国家发展和改革委员会能源研究所、能源基金会、德国国际合作机构、国际自然资源保护协会、国网能源研究院、中国电力科学研究院、东南大学、北京交通大学等单位、机构和专家的大力支持。

本分册为《通用节能技术》，由中国电力科学研究院主编。蒋利民、孟珺遐、何桂雄、杨小彬、闫华光编写了第一章，郭艳飞、黄伟、蔡亮编写了第二章，

杨雷娟、刘尧编写了第三章，苗常海、李斌、钟鸣、刘畅编写了第四章，王鹤、王昊、陈企楚、林晶怡、陈宋宋编写了第五、六章。全书由中国电力科学研究院周昭茂主审。

由于编写时间仓促，书中难免存在疏漏之处，恳请各位专家和读者提出宝贵意见。

编 者

2013 年 6 月

目 录

前言

绪论 1

第一章 供配电节能技术 3

第一节 无功补偿技术 3

第二节 变压器经济运行技术 12

第三节 低损变压器技术 19

第四节 电能质量治理技术 26

第二章 绿色照明技术 36

第一节 照明系统主要能效参数 36

第二节 节能灯技术 39

第三节 LED 灯技术 42

第四节 照明控制节能技术 50

第三章 暖通空调系统节能技术 56

第一节 概述 56

第二节 热泵技术 64

第四章 建筑围护结构节能技术 73

第一节 概述 73

第二节 外墙保温节能技术 75

第三节 门窗节能技术 77

第四节 幕墙节能技术 79

第五节 遮阳系统节能技术 81

第六节 典型案例	82
第五章 工业余热余压利用技术	84
第一节 概述	84
第二节 烧结机余热发电技术	86
第三节 水泥窑余热发电技术	88
第四节 玻璃窑余热发电技术	91
第五节 循环水采暖技术	96
第六节 高炉煤气余压透平技术	99
第七节 蒸汽系统优化技术	101
第八节 热功联产技术	104
第九节 冷凝水回收技术	107
第十节 蒸汽回收技术	109
第六章 工业锅炉（炉窑）节能技术	113
第一节 概述	113
第二节 分体式热管换热器技术	114
第三节 烟气冷凝器技术	117
第四节 蓄热式燃烧技术	120
参考文献	123

绪 论

随着国民经济的飞速发展,我国全社会能源消耗量激增,源供给与能源消耗之间的矛盾越来越突出。据统计,如果按照“十一五”期间我国能源消费的增长速度,不久的将来,我国将需要消耗掉全世界的年能源供给量,显然这种经济增长模式是不可持续的。面对能源供应匮乏的严峻挑战,除了调整经济结构,发展高附加值、低能源消耗的高新技术产业外,另一条有效途径就是利用节能技术,提高能源使用效率,降低单位产品能耗。

节能是指使用更少的能源得到同样性能的产品或服务。节能技术就是能够提高能源利用效率,减少能源浪费的技术。节能技术几乎遍布工业生产、人民生活的所有方面,种类繁多,但是,其节能原理不外乎以下两条:

第一,减少能源浪费。具体包含两条途径:第一条是实现废弃能源的再利用。例如锅炉安装空气预热器和省煤器,充分利用锅炉排烟的废热,加热助燃空气或锅炉给水,减少了排烟中携带热能;再如水泥窑余热发电技术,利用窑头窑尾废弃的气体中蕴含的热能,生产过热蒸汽进行发电。第二条是“按需供能”,避免能源“供大于求”。例如一台工况波动频繁的风机加装变频设备,并实现风量闭环控制风机转速,按照工艺生产的实际需要量进行风量供应,避免了供大于求造成的能源损失;再如供暖系统的气候补偿技术,根据气温变化情况及时调整房间的供热量,实现“按需供热”。

第二,能量系统优化。这需要抛开具体耗能设备,站在系统的层面看问题,考虑能量系统的优化匹配,协调调度。例如多台变压器的优化运行技术,就是根据各台变压器的损耗特性,合理分配电力负荷,实现总的电能消耗最小化;再如石化工艺中的夹点技术,合理调整各个加热冷却环节的温度,实现整个热

力系统热能利用率最大化。

面对林林总总、五花八门的节能技术，我们从中挑选出技术成熟、节能效果显著的六类典型节能技术，包括供电节能技术、绿色照明技术、暖通空调系统节能技术、建筑围护结构节能技术、工业余热余压利用技术和工业锅炉（窑炉）节能技术。其中，供电节能技术主要介绍无功补偿、变压器经济运行、低损变压器和电能质量治理技术；绿色照明技术主要介绍节能灯技术、LED 灯技术和智能照明控制技术；暖通空调系统节能技术主要介绍热泵技术；建筑围护结构节能技术主要介绍外墙、门窗和幕墙节能技术；工业余热余压利用技术主要介绍水泥窑、玻璃窑和烧结冷却机等余热发电技术；工业节能技术主要介绍分体式热管换热器技术和烟气冷凝式换热器技术。

供配电节能技术

第一节 无功补偿技术

一、技术背景

无功补偿技术是借助于无功补偿设备提供额外的无功功率来提高电力系统的功率因数，从而降低电网损耗、改善电网电压质量。

当负载的功率因数比较低时，大量的无功功率流经供电线路和变压器，由于线路和变压器存在阻抗，造成线路和变压器首末端存在电压差，引起系统电压偏离标称值。下面以一条简单的供电线路为例，说明无功功率补偿与电压损失的关系。

图 1-1 是不计线路分布电容的影响时供电线路的等值电路。

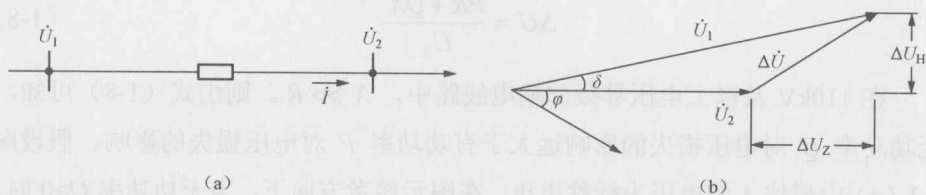


图 1-1 简单供电线路等值电路（不计线路分布电容的影响）

设 $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$ ，负载的视在功率为

$$\tilde{S} = P + jQ = \dot{U}_2 \times \dot{i} \quad (1-1)$$

则有

$$\dot{I} = \frac{\tilde{S}}{\dot{U}_2} = \frac{P - jQ}{U_2} \quad (1-2)$$

线路首末端电压的相量差，即线路的电压降 $\Delta \dot{U}$ 为

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{I} \times (R + jX) \quad (1-3)$$

将式 (1-2) 代入式 (1-3) 可得

$$\Delta \dot{U} = \frac{PR + QX}{U_2} + j \frac{PX - QR}{U_2} \quad (1-4)$$

可表示为

$$\Delta \dot{U} = \Delta U_z + j\Delta U_H \quad (1-5)$$

其中， ΔU_z 和 ΔU_H 分别是 $\Delta \dot{U}$ 的横分量和纵分量，其表达式分别为

$$\begin{aligned} \Delta U_z &= \frac{PR + QX}{U_2} \\ \Delta U_H &= \frac{PX - QR}{U_2} \end{aligned} \quad (1-6)$$

规定电压损失为线路首末端电压的均方根值之差，即

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (1-7)$$

一般，线路两端电压的相角差 δ 较小，电压降纵分量对电压损失的影响可以忽略不计，可把电压降横分量近似看作电压损失，即

$$\Delta U \approx \frac{PR + QX}{U_2} \quad (1-8)$$

在 110kV 及以上电压等级的输电线路中， $X \gg R$ 。则由式 (1-8) 可知，无功功率 Q 对电压损失的影响远大于有功功率 P 对电压损失的影响。假设图 1-1 (a) 中母线 1 的电压为标称电压，在图示参考方向下，当无功功率 $Q > 0$ 时，则意味着母线 2 的无功功率不足，需要从系统吸收无功功率。由式 (1-8) 可知，电压损失 $\Delta U \approx QX/U_2 > 0$ ， $U_2 = U_1 - \Delta U < U_1$ ，也就是说母线 2 的电压低于标称电压；反之，当无功功率 $Q < 0$ 时，意味着母线 2 的无功功率过剩，需要向系统输出无功功率，电压损失 $\Delta U \approx QX/U_2 < 0$ ， $U_2 = U_1 - \Delta U > U_1$ ，也就是说母线 2 的电压高于标称电压。由此可见，母线 2 的无功功率只要不平衡，无论

出现无功功率不足还是过剩,均会导致母线 2 的电压偏离标称电压。无功功率不平衡越严重,电压偏差越大。

如果能维持无功功率平衡,使输电线路及变压器中尽量不流过无功电流,就可以维持电压稳定、保证电压质量。无功补偿技术在此背景下得到了快速的发展。

二、技术原理

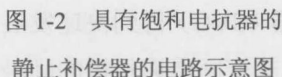
(一) 常用无功补偿设备的技术原理

常用的无功功率补偿设备包括同步调相机和固定电容器。随着电力电子技术的发展,静止无功补偿装置(SVC)、静止无功发生器(SVG)得到快速发展。

同步调相机实质上是不带机械负载的同步电动机。改变同步调相机的励磁,可以使同步调相机工作在过励磁或欠励磁状态,从而发出或吸收无功功率。它是最早采用的无功调节设备之一。同步电动机处在过励磁状态时,可以从电网汲取相位超前于电压的电流,从而改善电网的功率因数。根据电网负载情况的不同,适当调节调相机的励磁电流,可改变调相机汲取的无功功率,使电网的功率因数接近于 1。在长距离输电线路中,线路电压降随负载情况的不同而变化。如果在输电线的受电端装一同步调相机,在电网负载重时,让其过励运行,增加输电线中滞后的无功电流分量,从而可减少线路压降;在输电线轻载的情况下,让其欠励运行,吸收滞后的无功电流,可防止电网电压上升,从而维持电网电压在一定的水平上。同步调相机的优点是:当系统故障引起电压下降时,同步调相机可以快速动作,输出大量感性无功功率,起到电压支撑的作用。

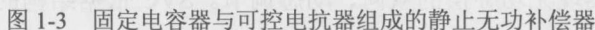
作为无功功率补偿用的电容器以并联的方式接入电力系统,电容器只能输出无功功率,其产生的无功功率大小可表示成 $Q_C = \omega C U_2^2$ 。并联电容器是目前最主要的无功补偿方法,其主要特点是价格低、效率高、运行成本低,在保护完善的情况下可靠性也很高。

静止无功补偿器基于电力电子技术及其控制技术,将电抗器与电容器结合起来使用,能实现无功补偿的双向、动态调节。SVC 依据结构的不同,通常可分为具有饱和电抗器的静止补偿器、固定电容器与可控电抗器组成的静止无功



(1) 具有饱和电抗器的静止补偿器。这种静止补偿器是由一台饱和电抗器 L_s 和一组并联电容器 C 组装而成, 其典型电路如图 1-2 所示, 电抗器的饱和电压高于正常运行电压区域。运行电压越高, 电抗器越饱和, 吸收的无功功率越大。饱和电抗器的固有斜率一般用串联电容器 C_s 进行校正。为了防止次同步谐振, 串联电容器并联阻尼绕组 R 。总的静止补偿器电压—电流特性的斜率可达 5%。为了减小饱和电抗器产生的谐波电流, 三相绕组绕在多个柱式和九柱式。饱和电抗器对吸收无功功率具有固有特性 (4 倍), 适合用来控制瞬时过电压。这种补偿器的动态适应性不如电容器组与晶闸管可控电抗器并联, 有功损耗也比后者大。

资料来源：根据作者调查整理。



这种装置通过电容器的分组投切提供不连续的容性无功功率，通过晶闸管控制的电抗器提供连续的感性无功功率。电容器通常串接一定量的电抗用于滤波，因为补偿器工作在感性模式时，会产生大量谐波。这种补偿器补偿的无功功率大小由晶闸管的触发角 α 决定，即 $Q_\alpha = |B_C - B_{L\alpha}| U^2$ ，其中 B_C 为电容器电纳， $B_{L\alpha}$ 为触发角为 α 时对应的电抗器电纳。由于电抗值可以调节，所以 $B_{L\alpha}$ 可以在很大的范围内变化。电压在 $U \pm \Delta U$ 范围内变化时，当电压高于 $U + \Delta U$ 时，具有电感的特性；在电压低于 $U - \Delta U$ 时，具有电容的特性。

(3) 可控电容器与可控电抗器组成的静止无功补偿器。这种补偿器既可实现感性无功的连续控制，又可实现容性无功的连续控制。它可用于改善系统在大扰动下的运行特性，并可有效降低系统的功率损耗。

基于可自关断器件实现的静止无功发生装置 (SVG, 又称为 STATCOM)，具有控制特性好、响应速度快、体积小、损耗低等一系列优点。SVG 的基本电路如图 1-4 (a) 所示。

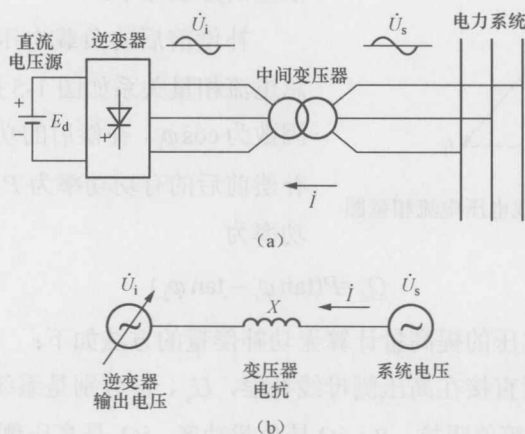


图 1-4 SVG 基本电路图及等效电路图

(a) SVG 的基本电路；(b) SVG 的等效电路

SVG 的逆变器通过中间变压器与电力系统连接，逆变器的输出电压 $\dot{U}_i$ 与电力系统电压 $\dot{U}_s$ 始终保持频率相同。通过调节 $\dot{U}_i$ 的大小可控制加在中间变压器

上的电压大小与方向,进而可以实现无功功率吸收与补偿的控制。因此,可将 SVG 用可控电压源替代,如图 1-4 (b) 所示。这样,SVG 提供的电流为

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_i}{jX}$$

依据不同的逆变器输出电压,可以得到不同相位和大小的电流,使补偿设备工作在空载模式、容性模式、感性模式、有源滤波模式。

(二) 无功补偿量的确定

无功补偿中,所需无功补偿量的确定是基础,方法有算法及实测法两种。

1. 算法

算法根据功率因数的改善目标计算所需补偿的无功功率,或者根据母线运行电压的提高量计算所需补偿的无功功率。

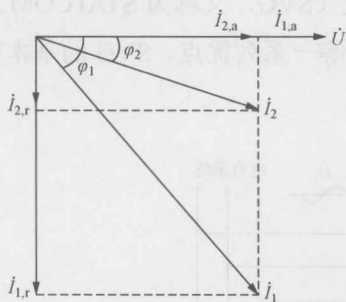


图 1-5 补偿前后负载电压电流相量图

根据功率因数的改善目标计算无功补偿量的方法如下:

补偿前后的负载电压及从电网取用的总电流相量关系如图 1-5 所示。补偿前功率因数为 $\cos \varphi_1$, 补偿后的功率因数为 $\cos \varphi_2$, 补偿前后的有功功率为 P , 则需补偿的无功功率为

$$Q_d = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (1-9)$$

按母线运行电压的提高量计算无功补偿量的方法如下:

无功补偿装置直接在高压侧母线补偿, U_s 、 U 分别是系统电压和负载侧电压, $R + jX$ 是系统等值阻抗, $P + jQ$ 是负载功率, jQ_d 是高压侧无功补偿量, U_1 、 U_2 分别是补偿装置投入前后的母线电压。

补偿装置投入前后, 系统电压、母线电压的量值存在如下关系

$$U_s = U_1 + \frac{PR + QX}{U_1} = U_2 + \frac{PR + (Q - Q_d)X}{U_2} \quad (1-10)$$

由式 (1-10) 可得