



NENGYUAN GUANLI PEIXUN JIAOCAI

能源管理培训教材

电气节能技术

天津市节能协会 组编
天津市能源管理职业培训学校



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



NENGYUAN GUANLI PEIXUN JIAOCAI
能源管理培训教材

电气节能技术

天津市节能协会 组编
天津市能源管理职业培训学校



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为推动重点用能单位能源管理体系建设,推广普及节能减排技术的应用,本书编者编写了能源管理培训教材。

本书分为基础篇、应用篇和案例篇,重点介绍了电气节能实用技术和实际案例。内容既包含了电工、电子、自动控制与信息处理、电机与拖动、电机调速、供配电系统、电化学、电加热等基础知识和原理,也涵盖了电热与电化学工业节能、电磁兼容性与电能质量控制、空调与照明系统节能、建筑节能等应用性技术与解决方案,并对可再生能源、新能源的利用和CO₂回收等技术做了简要介绍。

本书可作为节能培训教材,也可供能源管理师、能源工程师、能源专业技师、能源评估师、能源审计师以及大专院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电气节能技术 / 天津市节能协会, 天津市能源管理职业培训学校组编. —北京: 中国电力出版社, 2013.4

能源管理培训教材

ISBN 978-7-5123-4341-2

I. ①电… II. ①天… ②天… III. ①电气设备—节能—技术—技术培训—教材 IV. ①TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 077061 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 6 月第一版 2013 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.5 印张 487 千字

印数 0001—3000 册 定价 88.00 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

《能源管理培训教材 电气节能技术》

编 委 会

主 编 王景梁

编写人员 俞 宁 王 勇 李志坚 吴爱国

曾永捷 李 玲 王云亮 侯建成

张大鹏 何 熠 李冬辉 陈志敏

朱天利 李 季 杜明星 赵 影

王 凯 肖 驰 计孝奎 郑丹丹

赵 欣

主 审 齐茂忠

审定人员 张文强 浦照云 郎万发 周新颖

王 亮 王 勇 周永山 王 硕

朱国宾 李 莲 董君瑞 严桂生

常瑞增 王 钰



节约能源是我国的基本国策，对贯彻落实科学发展观具有重要意义。天津市委、市政府高度重视节能工作，坚持以结构节能为根本、以科技节能为支撑、以管理节能为保障，狠抓目标责任落实，努力实现节能与经济社会发展相互促进，为经济长期平稳较快发展创造条件。

多年的节能工作经验告诉我们，再好的制度措施离开了强有力的节能管理队伍都难以落实。打造一支高水平、专业化的节能工作队伍，对于保障节能约束性目标的完成、促进节能工作再上新台阶具有重要意义。为此，天津市不断加强节能管理队伍建设，从2002年起，实行重点用能单位能源管理人员持证上岗制度，培训考核2000余人，节能管理向制度化、科学化、规范化发展。2009年底，天津市和山东省被确定为国家首批能源管理师试点。2012年，天津市能源管理职业培训学校建立，是我国首家专业能源管理职业培训学校。重点用能单位积极响应国家发改委号召，健全企业能源管理体系。经过近三年的探索，天津市已在能源管理师制度研究、教材编写、培训考核、能源管理体系建设等方面进行了一些有益的尝试。本教材的编写出版，也是天津市能源管理师试点工作阶段性成果之一。下一步，天津市将继续按照国家试点统一安排，进一步完善能源管理师制度设计，推动开展GB/T 23331（ISO 50001）能源管理体系建设工作，加强能源管理队伍建设，提高能源管理人员素质，为在全国建立能源管理师制度积累经验。

“十二五”的大幕已经开启，节能形势依然严峻，任务仍然很重。希望广大节能工作者以国家在天津市试点能源管理师制度为契机，拓宽知识范围，掌握先进技术，提升自身能力，开拓工作思路，为促进天津市经济又好又快发展作出更大的贡献。

王景梁

2013.4

前言

能源与环境问题是当今社会人类面临的共同问题。我国目前正处于工业化、城镇化加快发展的重要阶段，能源资源的消耗强度高，消费规模不断增大，能源供需矛盾突出，生态环境脆弱。解决我国能源环境问题，根本出路是走建设资源节约型、环境友好型社会的可持续发展之路。

党的十八大报告中明确指出坚持节约资源和保护环境的基本国策，把生态文明建设放在突出地位。电气节能技术是能源节约领域古老而崭新的课题，面对我国日益严峻的能源供应形势和飞速发展的电气软硬件技术创新，在物联网、大数据时代已经来临的今天，全新的电气节能技术革命将拉开序幕，担当起更多的节能责任和义务。

《能源管理培训教材 电气节能技术》主要以电气专业节能技术为主，目的是从宏观电气行业节能中提取更多的电力资源，减少工业电能损耗。基础篇第一章至第七章，深入浅出地讲解了电气基础知识，为广大科学技术人员提供理论依据。应用篇第八章至第十五章，详细讲述了各电气能源领域的最新节能技术、手段、措施及系统方案，是本书中最为突出的部分，是启迪科技节能人员技术创新的不二选择。第十六章专辟为案例篇，以理论结合实际的方式阐述了科技节能技术在实际工作中的推广及应用，这些案例可以为节能技术人员提供参考，以利于电气节能技术更加广泛地应用到各个领域。

本书蒙各位领导、参编单位电气科技专家的关心与支持，得以与广大读者见面，在此衷心表示感谢！对天津市节能协会、天津电气设计与应用专业委员会、天津大学、天津理工大学、天津市能源管理职业培训学校、天津大学建筑设计规划研究总院、天津市建筑设计院、天津电力科学研究院、中国汽车工程公司、天津华汇工程建筑设计有限公司、天津轻工业设计院、西门子（中国）有限公司、上海安科瑞电气股份有限公司、天津市华萌科技有限公司、天津市电力公司城南供电分公司、《资源节约与环保》杂志社等参编单位在本书编写和出版过程中的大力支持，特此表示感谢！但由于编者能力和水平所限，书中难免会有疏漏之处，我们真诚盼望您的斧正。

编者
2013.4



序
前言

第一篇 基础篇

第一章 电路基础	3
第一节 电磁场基础	3
第二节 三相正弦交流电路	6
第二章 电子技术与电气测量	10
第一节 电子技术基础	10
第二节 电气测量基础	19
第三章 自动控制与信息处理	27
第一节 自动控制原理	27
第二节 信息处理	33
第三节 数据库基础知识	35
第四章 电动机与电力拖动基础	37
第一节 电动机概述	37
第二节 三相异步电动机的功率与损耗	48
第三节 交流电机拖动	50
第四节 异步电动机的节能	57
第五章 电机调速系统	60
第一节 直流电机调速概述	60
第二节 直流双闭环调速系统	62
第三节 交流电机调速概述	63
第四节 异步电动机调压调速系统	66
第五节 交流电动机变频调速系统	70
第六节 异步电动机矢量变换控制系统	80
第七节 无换向器电动机调速系统	81
第六章 工厂供配电系统与负荷计算	84
第一节 工厂供配电系统的组成	84
第二节 工厂供配电系统的接线	84

第三节	三相用电设备组计算负荷的确定	90
第四节	单相用电设备组计算负荷的确定	91
第五节	工厂的计算负荷及年耗电量的计算	92
第六节	变压器应用	95
第七章	电能质量与节能	99
第一节	电能质量概述	99
第二节	电压偏差及其调节	100
第三节	电压波动和闪变及其抑制	102
第四节	高次谐波及其抑制	102
第五节	供电系统的三相不平衡	104
第六节	供电系统的无功功率补偿	105
第七节	节约用电的意义及其一般措施	106

第二篇 应用篇

第八章	电气传动系统方案与节能	109
第一节	电气传动系统的组成	109
第二节	生产机械的负载类型和生产机械的工作制	110
第三节	电动机节能技术探讨	112
第九章	电加热设备及节能	115
第一节	电加热设备	115
第二节	电加热设备节能技术	126
第十章	电化学及节能	135
第一节	电化学理论	135
第二节	电化学反应器	144
第三节	电化学的能源管理	148
第十一章	空调及节能	153
第一节	空调理论及设备	153
第二节	典型空调自控系统	165
第三节	空调的节能	174
第十二章	照明及节能	180
第一节	光、色度等基本概念	180
第二节	光源原理、能效分析和选择	184
第三节	照明标准	199
第四节	照明节能方法与措施	201
第十三章	电磁兼容技术与电能质量的系统化管理	207
第一节	电磁污染的产生、危害以及治理	208
第二节	谐波的产生与消除	219

第三节	静电的危害与防护措施·····	230
第四节	电能质量的系统化管理与控制·····	238
第十四章	建筑节能·····	243
第一节	建筑节能综合节能解决方案·····	243
第二节	建筑能耗监测解决方案·····	247
第三节	围护结构整体节能解决方案·····	250
第四节	建筑空调系统的节能·····	254
第五节	照明系统节能·····	261
第六节	动力系统节能解决方案·····	268
第七节	供配电节能解决方案·····	274
第八节	供热系统节能解决方案·····	276
第九节	新能源利用方案·····	279
第十五章	节能新技术、新能源发展与应用·····	285
第一节	风力发电概述·····	285
第二节	海洋能概述·····	287
第三节	生物能源概述·····	288
第四节	碳捕集与封存, CO ₂ 的回收、净化和再利用技术·····	289

第三篇 案例篇

第十六章	典型节能项目案例选编·····	295
第一节	某办公楼的节能改造案例·····	295
第二节	某公司水泥生产线高压变频改造案例·····	300
第三节	电力监控系统选型方案及典型案例·····	302
第四节	三相异步电机自适应节能技术方案及典型案例·····	309
参考文献 ·····		317



第一篇 基础篇

电 路 基 础

第一节 电 磁 场 基 础

一、电路的基本定律

(一) 欧姆定律

$$u = iR \quad (1-1)$$

(二) 基尔霍夫电流定律 (KCL)

在电路节点上

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (1-2)$$

(三) 基尔霍夫电压定律 (KVL)

在闭合回路中

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0 \quad (1-3)$$

二、磁场的基本概念

通电导体周围会产生磁场，磁场是一个矢量。

(一) 磁感应强度

磁感应强度又称为磁通密度，表示磁场中某一点磁场强弱和方向的矢量。它的方向与产生磁场的电流方向遵循右手螺旋定则。大小可用单位正电荷在场中以单位速度沿与磁场垂直方向运动时所受的最大磁场力来表述，即

$$F = qv \times B \quad (1-4)$$

式中： B 为磁感应强度，单位为 T，特 [斯拉]。

(二) 磁通量

磁感应强度 B 的通量，即穿过某一截面积 S 的磁力线总量，单位为 Wb，韦 [伯]。

$$\Phi = \int B \cdot dS \quad (1-5)$$

对于均匀磁场，若 B 与 S 垂直，则上式变为 $\Phi = BS$ 。

(三) 磁场强度

介质中某点的磁感应强度 B 与介质磁导率 μ 之比。

$$H = B/\mu, \quad B = \mu H \quad (1-6)$$

式中： H 为磁场强度，单位为 A/m，安[培]每米； μ 为磁导率，单位为 H/m，亨[利]每米。

真空的磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ，任意物质的磁导率为 $\mu = \mu_r \mu_0$ ， μ_r 为该物质的相对磁导率。

(四) 磁动势

流过线圈电流 i 与线圈匝数 N 的乘积，磁动势的单位为安匝。

$$F = Ni \quad (1-7)$$

(五) 安培定则

表示电流方向和电流激发磁场的磁力线方向间关系的定则，也叫右手螺旋定则，如图 1-1 所示。

(1) 通电直导线中的安培定则（安培定则一）：用右手握住通电直导线，让大拇指指向电流的方向，那么四指的指向就是磁感线的环绕方向；

(2) 通电螺线管中的安培定则（安培定则二）：用右手握住通电螺线管，使四指弯曲与电流方向一致，那么大拇指所指的那一端是通电螺线管的 N 极。

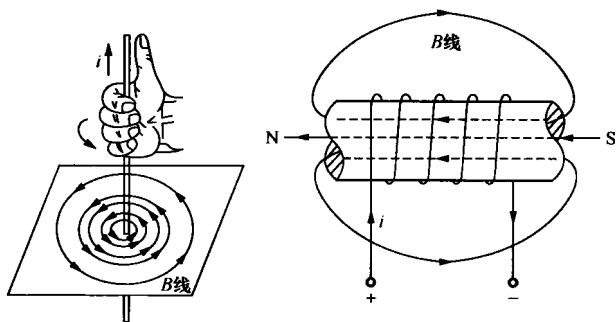


图 1-1 磁力线方向与电流方向之间的右手螺旋关系

三、基本电磁定律

(一) 楞次定律

闭合线圈中感应电流的方向总是使得它自己所产生的磁场反抗原来磁通量 Φ 的变化。

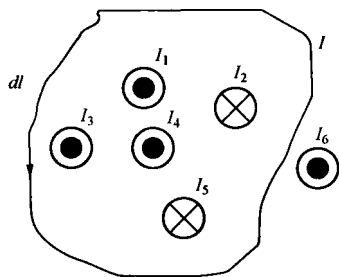


图 1-2 安培环路定律

(二) 安培环路定律

安培环路定律也称全电流定律，是表示电流与所产生的磁场之间关系的定律。

设空间有多根载流导体，流过的电流分别为 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 。则沿任何闭合路径 L 对磁场强度 H 的线积分，等于该闭合回路所包围的电流的代数和 $\oint_L H \cdot dl = \sum I_k$ ，其中电流的正方向与闭合回路的正方向满足右手螺旋定则。

对于图 1-2 有： $\oint_L H \cdot dl = \sum I_k = I_1 - I_2 + I_3 + I_4 - I_5$

(三) 法拉第电磁感应定律

无论何种原因使得与闭合线圈交链的磁链 Ψ 随着时间 t 变化时，线圈中将会产生感应电

动势 e 。

1. 变压器电动势

绕组和磁场无相对位置运动，与绕组相交链的磁链 $\psi = N\Phi$ 发生变化而在绕组中产生感应电动势。大小与磁链的变化率成正比，方向由楞次定律确定。

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-8)$$

参考正方向：一般先选定 Φ 的参考方向，再用右手螺旋定则确定 e 的参考方向。

如图 1-3：当 $d\Phi/dt > 0$ 时， e 产生的 Φ 应该与原来的 Φ 方向相反（指向下），对应的感应电流由 X 流向 A，对应 e 与参考方向相反，为负；当 $d\Phi/dt < 0$ 时， e 产生的 Φ 应该与原来的 Φ 方向相同（指向上），…，所以 e 和 $d\Phi/dt$ 总是有相反的符号。

2. 切割电动势

绕组和磁场间有相对位置运动，绕组中的导线切割磁场而产生感应电动势。

设磁场的磁感应强度（磁密）为 B ，切割磁力线的导体长度为 l ，切割速度为 v ，三者之间互相垂直， e 的方向用右手定则确定，如图 1-4 所示， e 的大小为

$$e = Blv \quad (1-9)$$

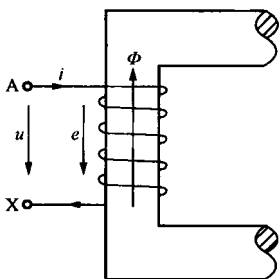


图 1-3 磁通与其感应电势的正方向
(假定电动机惯例设定的参考方向)

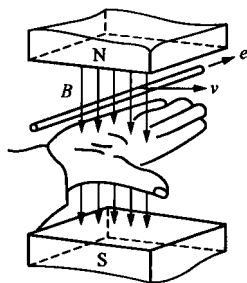


图 1-4 感应电势与磁场、导体运动
速度之间的右手定则

(四) 电磁力定律

通电导体在磁场中受到磁场对它的作用力称为电磁力，也称安培力。设直导线 l 与磁感应强度 B 的方向垂直，受力方向用左手定则确定，如图 1-5 所示，电磁力的大小为

$$f_{em} = Bil \quad (1-10)$$

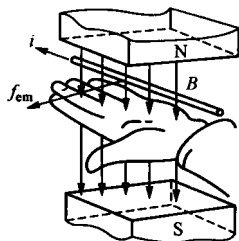


图 1-5 通电导体产生的电磁力与电流、磁场之间的左手定则

第二节 三相正弦交流电路

一、对称三相电源

对称三相电源是由 3 个等幅值、同频率、初相依次相差 120° 的正弦电压源联结成星形或三角形组成的电源，这三个电源依次称为 U 相、V 相、W 相，如图 1-6 所示为三相正弦电压的波形。

三相正弦电压的解析式为

$$\left. \begin{aligned} u_U &= \sqrt{2}U \sin \omega t \\ u_V &= \sqrt{2}U \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_W &= \sqrt{2}U \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

式中以 U 相电压 U_U 作为参考正弦量。三相正弦电压对应的相量形式为

$$\dot{U}_U = U \angle 0^\circ, \quad \dot{U}_V = U \angle -120^\circ, \quad \dot{U}_W = U \angle 120^\circ$$

$$\dot{U}_U + \dot{U}_V + \dot{U}_W = 0$$

$$u_U + u_V + u_W = 0$$

三相正弦电压的相量如图 1-7 所示。

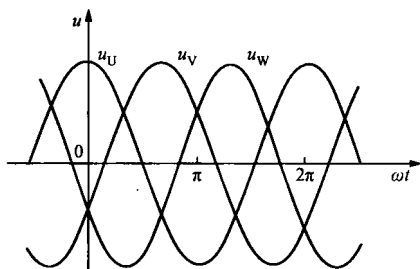


图 1-6 三相正弦电压的波形

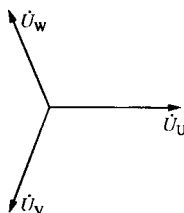
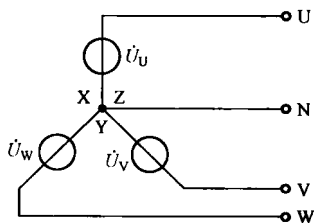


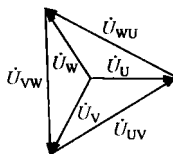
图 1-7 三相正弦电压的相量图

(一) 对称三相电源的星形 (Y) 联结

将三个电压源的末端 X、Y、Z 相联，分别由三个首端引出三根端线 U、V、W，称为 Y 形联结，X、Y、Z 的联结点称为中性点，如图 1-8 (a) 所示。电压的相量关系如图 1-8 (b) 所示。



(a)



(b)

图 1-8 电源星形 (Y) 联结相量图

(a) 联结示意图；(b) 电压相量图

(二) 对称三相电源的三角形 (Δ) 联结

将三个电压源的首、末端顺次序相连, 再从三个顶点引出三根端线 U、V、W, 构成 Δ 形联结, 如图 1-9 (a) 所示。电压的相量关系如图 1-9 (b) 所示。

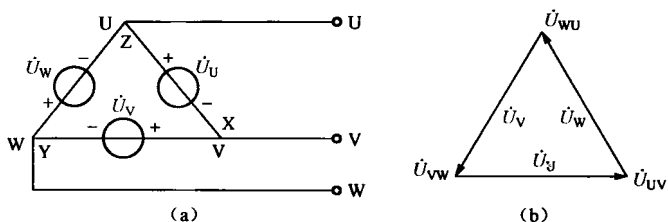


图 1-9 电源三角形 (Δ) 联结相量图

(a) 联结示意图; (b) 电压相量图

二、三相负载的连接

(一) 三相负载的星形 (Y) 联结

对于不对称的三相负载, 供电系统为三相四线制, 如图 1-10 所示。对称三相负载为三相三线制。

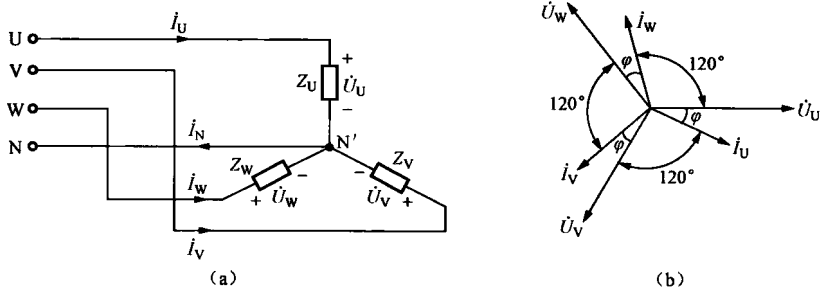


图 1-10 负载星形 (Y) 联结相量图

(a) 联结示意图; (b) 电压相量图

(二) 三相负载的三角形 (Δ) 联结

三相负载 Δ 形联结时, 各相首尾端依次相联, 三个连接点分别与电源的端线相联结。要求供电系统为三相三线制。三相负载无论对称与否, 相电压一般总是对称的。负载的三角形 (Δ) 联结时电压电流相量图如图 1-11 所示。

三、三相正弦交流电路的功率

(一) 平均功率 P (有功功率)

平均功率又称有功功率, 表征单口网络消耗掉的电能, 大小指在一个周期内的平均值

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^T [UI \cos \theta_z - UI \cos(2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)] dt \\
 &= UI \cos \theta_z
 \end{aligned} \tag{1-12}$$

其单位为瓦 (W)。

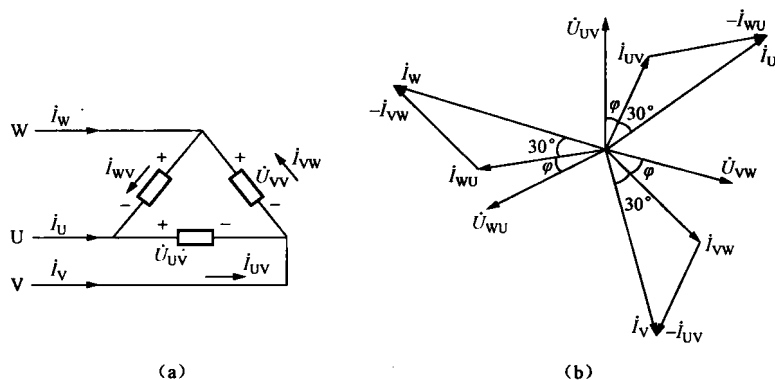


图 1-11 负载三角形 (Δ) 联结相量图

(a) 联结示意图; (b) 电压相量图

(二) 无功功率 Q

无功功率反映电源 (或外电路) 和单口网络内储能元件之间的能量交换情况。

$$\left. \begin{aligned} Q &= UI \sin \theta_z = I^2 X = -U^2 B \\ Q &\neq \pm \frac{I^2}{B} \\ Q &\neq \pm \frac{U^2}{X} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

其单位为乏 (Var)。

(三) 视在功率 S

视在功率是满足一端口电路有功功率和无功率两者的需要时, 要求外部提供的功率容量。

$$S = UI \quad (1-14)$$

其单位为伏安 (VA)。

(四) 三相功率

三相电路中, 三相负载的有功功率等于各相负载有功功率之和, 即

$$P = P_U + P_V + P_W \quad (1-15)$$

对称三相负载的功率

$$P = 3P_p = 3U_p I_p \cos \varphi \quad (1-16)$$

同理, 对称三相负载无功功率

$$Q = 3U_p I_p \sin \varphi = \sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi \quad (1-17)$$

三相电路的视在功率

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_p I_p = \sqrt{3} U_l I_l \quad (1-18)$$

式中: U_p 为相电压, I_p 为相电流, U_l 为线电压, I_l 为线电流。