

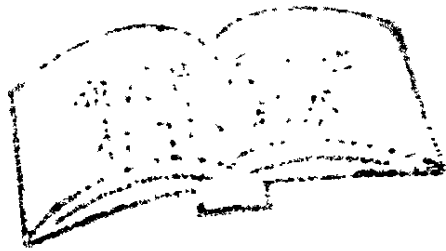


$$Q = UI \sin \varphi$$

无功电功率

浙江科学技术出版社

封面设计：邵秉坤



无功电功率

陆安定 编著

*

浙江科学技术出版社出版

浙江印校印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

开本787×1092 1/32 印张7.5 字数165,000

1984年7月第一版

1984年7月第一次印刷

印数：1—4,800

统一书号：15221·61

定 价： 0.79 元

内 容 提 要

本书系统地论述无功电功率的技术和管理问题，从基础理论开始，讨论无功负荷、无功电源和电力网及电力系统中的无功功率。

书中介绍了现代工业中与无功功率相关的一系列新的技术问题，与无功功率相关的各种节能措施，无功功率管理与经济运行，保证电能质量与安全运行等问题。

本书供从事发电、变配电、工矿企业供电、农业用电的工程技术人员和管理干部阅读；对大专院校师生亦有一定参考价值。

序

在交流电的发电、输电、配电、用电整个过程中，随着有功功率的产生，同时孪生无功功率。

从宏观角度看，一个装机容量100万千瓦运行着的电力系统，实际上也同时是一个装置容量为120~150万千瓦乏的无功功率系统在运行。

这个无功系统正如有功系统一样，由无功电源、网络、无功负荷组成的；无功负荷也可以绘制它的年、月、日负荷曲线，进行无功功率平衡；无功电源也有它的冷、热备用容量；一套对有功功率的运算方法，在无功功率的研究中，都是适用的。

研究无功功率的目的，在今天已不再仅仅是为了提高工矿企业中的功率因数；而是有着更广泛的重要意义，概括地讲有以下四个目的：

一、为了解决现代电力系统中与无功功率相关的一系列新的技术问题。例如：

1. 无功静态稳定问题。无功电源不足会引起电网电压崩溃，造成严重事故。

2. 无功功率动态平衡问题。当无功功率过剩时，要求发电机进相运行。

3. 由于电容性无功功率引起发电机自励磁问题。

4. 输电中的波阻抗与 Ferrantia 效应。

5. 由潜供电流引起单相快速自动重合闸的电弧不能熄灭问

题。

6. 从15000千乏无功功率上升到70000千乏的时间只有90多秒的冲击性无功负荷的调节。

7. 无功功率中的高次谐波公害和闪变概念。

8. 由跟随馈电系统引起的负荷功率因数的变化与改善。

.....

在电力技术、可控硅技术和电子技术发展的今天，上述这些新的技术问题的解决办法，国内外都已有不少文献报导，正是由于这一系列问题的解决，为电力工业的发展开辟了道路。

二、研究无功功率是为了节能。电能是二次能源，无功功率在电网中不断循环，造成二次能源的浪费是非常可观的。一个100万千瓦的电力系统，如果无功功率问题处理得好，每年从这个电网的发电厂、变电所、用户中节约的电能超过1亿度；并且可以使这个系统中2~3万千瓦的发电机、变压器和输变电设备节约下来。

三、研究无功功率是为了掌握它的经济规律。通过统计、理论分析和各项技术措施来达到经济运行的目的。

四、研究无功功率是为了保证电能质量，促使电力系统安全运行。

无功功率问题，根据世界各个地区电力系统近数十年来的运行经验，积累了大量资料；我国几个电力系统亦同样积累了许多可贵的经验；把这些资料经过统计分析，整理出一整套无功功率的经济规律，广泛应用到生产实践中去，是有一定的重要价值的。

为了总结这方面的经验，作者整理了从事发电厂、电力系统设计、工业企业供电设计及节能工作30多年来有关无功功率的笔记；并参考、节译了国内外各种文献资料；系统地整理总

结无功功率的理论和应用，编汇成册，由浙江科学技术出版社出版。

希望本书对从事发电、变配电、工矿企业供电的工程技术人员和管理干部能有一定的参考价值，对我国四化建设起涓滴作用。

编 著 者

1983年8月

目 录

序

第一章 电功率的基础理论

第一节 交流电阻电路	(2)
一 电阻电路中电压与电流的关系	(2)
二 瞬时功率与平均功率	(4)
三 电阻电路的能量转换	(5)
第二节 交流电感电路	(6)
一 电感电路中电压与电流的关系	(6)
二 感性无功功率与磁场储能	(8)
第三节 交流电容电路	(10)
一 电容电路中电压与电流的关系	(10)
二 容性无功功率与电场储能	(12)
第四节 电阻与电感串联的电路	(14)
第五节 电阻、电感、电容串联的电路	(16)
第六节 并联补偿电路	(17)
第七节 有功功率、无功功率及视在功率	(19)
一 Q 、 S 与 P 及 $\cos \phi$ 的关系	(20)
二 复数与极坐标换算	(21)
三 无功功率补偿计算	(23)
第八节 功率因数的确定	(24)
一 功率因数的瞬时值	(24)
二 功率因数的平均值	(25)
三 加权平均功率因数	(26)

第二章 无功负荷

- 第一节 按设备分类论无功负荷的构成 (27)
- 第二节 工矿企业中提高功率因数的节能效益 (29)
- 第三节 感应电动机的负荷率与功率因数的关系
..... (30)
- 第四节 感应电动机的合理使用与节能..... (32)
- 第五节 降低轻负载感应电动机的电压..... (35)
 - 一 降低电动机的电源电压 (37)
 - 二 改变电动机的内部接线 (37)
- 第六节 感应电动机的定子绕组由 Δ 形改为Y形
..... (38)
- 第七节 Δ -Y接线的自动切换 (41)
- 第八节 感应电动机定子绕组的几种改接方式
..... (44)
 - 一 双路并联定子绕组改接成单路串联 (44)
 - 二 并联双路星形绕组改成串联单路三角形 (45)
 - 三 并联双路三角形绕组改成并联双路星形 (46)
 - 四 并联双路三角形绕组改成串联单路星形 (46)
 - 五 其他改接方法 (47)
- 第九节 怎样控制感应电动机的空载损失..... (48)
- 第十节 几种常用的切除空载电动机的装置 (50)
 - 一 机床半自动停机装置 (50)
 - 二 故障电控切除电动机装置 (51)
 - 三 冲床空载自动停机装置 (52)
- 第十一节 感应电动机检修质量对功率因数的影响
..... (54)
- 第十二节 异步电动机同步化 (55)
- 第十三节 同步电动机在工矿企业中的应用..... (61)

第十四节	变压器的无功损耗	(63)
一	避免变压器轻载运行	(63)
二	切除空载变压器	(65)
第十五节	工频感应电炉	(66)
第十六节	电焊机与弧焊变压器	(69)
一	采用限制空载装置的节能效益	(69)
二	交流电焊机手控式及简易自动式开、停机装置	(70)
三	三种交流电焊机空载自停装置的结线图	(72)
四	三种直流电焊机空载自停装置的结线图	(77)
第十七节	可控硅串级调速引起的无功损耗	(82)
一	采用可控硅串级调速的节能意义	(82)
二	常规串调与超前导通串调的无功损耗	(83)
第十八节	大型硅整流装置的功率因数	(86)
第十九节	各种工业设备的无功功率	(87)
第二十节	典型工厂及车间的无功负荷	(89)
第二十一节	工业分行业无功负荷的构成	(94)
第二十二节	农业用电的无功负荷	(96)
一	农业用电的无功负荷	(96)
二	降低无功损耗的措施	(97)
第二十三节	市政用电及生活用电的功率因数	(100)
一	市政、生活用电的功率因数	(100)
二	照明及家用电器设备的功率因数	(100)
第二十四节	无功负荷的测量	(101)
第二十五节	检查用户自然功率因数的节能意义	(104)
第二十六节	论《按力率调整电费办法》的利弊	(105)

第二十七节 跟随馈电系统与功率因数控制器

- (109)
- 一 电气传动系统中的跟随馈电 (109)
- 二 功率因数控制原理 (110)
- 三 Frank Nola 型功率因数控制器..... (112)

第三章 无功电源

- 第一节 无功电源的结构 (114)
- 第二节 发电机的励磁电流与无功出力的关系..... (116)
- 第三节 带负载发电机的励磁电流与无功出力的关系
..... (118)
 - 一 正常励磁情况 (119)
 - 二 过励磁情况 (119)
 - 三 欠励磁情况 (120)
- 第四节 同步发电机的U形曲线 (121)
- 第五节 同步发电机的无功出力 (123)
 - 一 有功出力与无功出力的极限值 (123)
 - 二 同步发电机的通用P—Q曲线 (125)
- 第六节 同步发电机轻载运行 (128)
 - 一 凸极同步发电机 (128)
 - 二 隐极同步发电机 (130)
- 第七节 水电站的调相运行..... (130)
 - 一 水电站的压气调相 (131)
 - 二 压气机及贮气筒的容量 (132)
 - 三 中小型水电站及电力排灌站的调相运行 (133)
- 第八节 火力发电厂的调相运行 (134)
 - 一 发电机与汽轮机分离运行 (134)
 - 二 汽轮发电机的无蒸汽运行 (135)
- 第九节 输电线路的电容性功率 (136)

第十节	电力系统中的无功补偿装置	(138)
第十一节	同步调相机	(140)
第十二节	移相电容器的类型	(143)
第十三节	移相电容器的补偿方式	(146)
一	个别补偿的适用范围	(147)
二	分组补偿与集中补偿	(148)
第十四节	移相电容器及其辅助电气设备计算	(149)
一	移相电容器的容量计算	(149)
二	移相电容器的辅助电气设备与保护	(150)
三	移相电容器的放电设备	(152)
第十五节	功率因数自动调节	(153)
一	按功率因数控制	(155)
二	按母线电压控制	(156)
三	按负荷电流控制	(158)
四	按昼夜时间控制	(158)
五	按无功功率的超前与滞后控制	(159)
六	按功率因数控制并按电压及负荷校正	(161)
第十六节	静止无功补偿装置	(162)
一	静止无功补偿装置的种类	(163)
二	负荷型静止无功补偿装置	(166)
三	线路型静止无功补偿装置	(171)
四	闪变的概念及其防止对策	(172)
第四章 电力网及电力系统中的无功功率		
第一节	超高压输电线的电容和互电容	(176)
第二节	波阻抗与 Ferrentia 效应	(178)
第三节	同步发电机的自励磁	(181)
第四节	超高压输电线的动态无功补偿	(183)

第五节	潜供电流问题	(186)
第六节	电力网中的无功静态稳定问题	(188)
一	无功负荷特性	(188)
二	无功电源特性	(190)
三	无功静态稳定	(192)
四	无功功率不足引起电网电压崩溃	(193)
五	电压崩溃的诱因及其防止对策	(194)
第七节	电网低电压运行的危害性及其防止对策	(196)
一	电网低电压运行的危害性	(197)
二	防止电网低电压的对策	(198)
第八节	电网周波对于无功负荷的影响	(200)
第九节	泛论电网中无功功率的经济规律	(203)
第十节	电力网的经济功率因数	(204)
一	输电线的经济功率因数	(205)
二	各级变电所的经济功率因数	(207)
第十一节	无功功率的经济当量	(209)
第十二节	电力网的电压与无功功率管理	(212)
一	电力网的电压管理	(212)
二	电力网的无功功率管理	(214)
第十三节	无功功率平衡	(215)
一	无功功率的标么值	(215)
二	无功功率平衡	(219)
三	无功负荷的峰谷差与无功电源的可调容量	(222)
第十四节	技术经济比较方法	(225)
一	折回年限法	(225)
二	计算费用法	(226)
三	考虑时间因素的计算费用法	(227)

第一章 电功率的基础理论

当电能转换成其他类型能量时，例如：电流通过白炽灯发光；通过电动机的传动使电能转换成机械能；通过钢厂电弧炉使电能转换成热能；通过化工厂的电解槽使电能转换成化学能；以及工频电流通过电台的高频发射台转换成电磁波等；这些在能量的转变过程中作功的电能，叫做有功电能。我们习惯上称其为“有功电功率”，或简称“有功功率”。

在交流电路中，除了电阻负载以外，还有电感负载和电容负载。例如：在电力网中使用最多的电动机与变压器，在运行中要产生磁场；而电容器及空载输电线则产生电场。交流电在电源与这类电感或电容负载之间往返流动，在流动中通过磁场或电场时，不会使电能转换成热能、机械能、化学能或其他任何类型的能量。此电能既不作功也不消耗，这种电能我们称它为无功电能，习惯上称为“无功电功率”，简称“无功功率”。

发电厂和电力网就是一个多种能量转换的系统。在火电厂的锅炉中燃烧油或煤，使水获得热能变成高压蒸汽，高压蒸汽推动汽轮机转动，将它所具有能量转换成机械能，汽轮机传动发电机又将机械能转换成电能。在水电站中将水的位能通过水轮机转换为机械能，水轮机再传动发电机又将机械能转换成电能。其他诸如燃气轮机发电、受控热核发电等都是将各种能量通过数次有功能量转换，最后转换成电能。电能由电力网传送给用户，用户如前所述又将电能转换成各种其他类型的能量，而在此转换过程中为人们作功，各种能量环绕有功电功率互相

转换。

在交流电的发电、输电、配电、用电整个过程中，随着有功功率产生，必然同时孪生无功功率。

在理论上，有功功率是电压与电流间夹角的余弦与电压电流的乘积；无功功率是该夹角的正弦与电压电流的乘积。由于无功功率在电源、电网、用户之间往返流动，该功率与网络内各元件的电阻又产生了有功损耗。更值得注意的是在实际应用中由于无功功率问题，使电网投资增加，年运行费用增加；而且由于无功容量缺乏（指电容性无功），造成电压质量下降，甚至发生故障，给工农业生产造成极其严重的后果。

第一节 交流电阻电路

一、电阻电路中电压与电流的关系

当一个交流电压 u 加在线性电阻 R 的两端，如图 1—1 所示。由于电压 u 是随着正弦函数瞬时变化的，如果其最大值是 U_m ，则交流电压的瞬时值是：

$$u = U_m \sin \omega t$$

式中 ω 是角速度，它的单位是弧度/秒；式中 t 是时间，它的单位是秒。角速度与频率成正比：

$$\omega = 2\pi f$$

式中 f 是交流电频率，我国交流电频率是 50 赫/秒。

根据欧姆定律，电阻两端电压和它通过的电流成正比。对

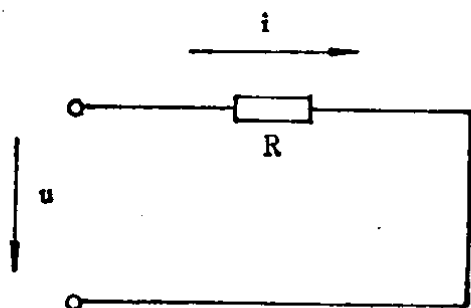


图 1—1 交流电阻电路

于交流电路来说，这个关系在任何一瞬间都应该成立，因此通过此电阻的电流瞬时值为：

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

在上式中 $I_m = \frac{U_m}{R}$ (1-1)

从上面几个关系式中不难看出，电路中的电流也是按正弦规律变化的，它变化的速度（即角速度），也与电源电压一致，而且电压与电流之间也不存在相角差，即二者周期性完全吻合。电压与电流曲线如图 1—2 所示；电压与电流矢量如图 1—3 所示。

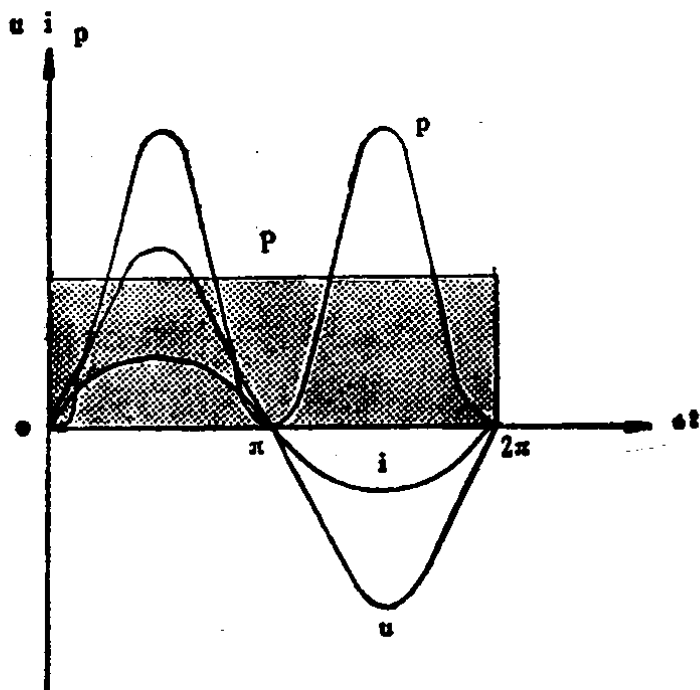


图 1—2 交流电阻电路的电压、电流、功率曲线



图 1—3 交流电阻电路的电压与电流矢量图

将式 (1—1) 两边都除以 $\sqrt{2}$ ，则可以导出电压有效值与电流有效值二者之间的关系：即在电阻电路中，电流有效值等于电阻两端电压的有效值除以电阻，如式 (1—2) 所示：

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-2)$$

二、瞬时功率与平均功率

在电阻中每一瞬间消耗的功率称为瞬时功率，它是电压瞬时值与电流瞬时值的乘积，即：

$$p = ui$$

将 u 及 i 代入并经三角函数演算可得：

$$\begin{aligned} p &= U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t \\ &= U_m I_m \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) \\ &= UI - UI \cos 2\omega t \end{aligned} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 把瞬时功率分成了两部分：第一部分是常数 UI ，表示一条直线。第二部分是交变份量 $UI \cos 2\omega t$ ，表示一条余弦曲线，其频率是电压频率的二倍，图 1-2 中的曲线 p 即是瞬时功率曲线。

由于电压与电流相序完全吻合，所以瞬时功率恒为正值。从物理概念来看，不论电流如何交变，电阻总是吸收能量，不断地把电能转换成热能。它在一个周期内吸收电能为：

$$W_T = \int_0^T p dt$$

因为瞬时功率时刻在变化，实用上意义不大。在电工技术中为了计算能量，采用瞬时功率在一个周期内的平均值来衡量功率，称之为平均功率，用下式表示：

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T UI(1 - \cos 2\omega t) dt \end{aligned}$$

$$=UI = I^2R = \frac{U^2}{R} \quad (1-4)$$

图 1—2 中的直线 P 表示平均功率。这个平均功率就等于电压与电流有效值的乘积。平均功率简称功率，在实用上都采用此平均功率。功率表计测定的也是此平均功率，不论电灯、电动机或者其他电气设备，其铭牌上表示的也都是平均功率。

三、电阻电路的能量转换

前面讲到在电阻电路中不论电流如何交变，电阻总是吸收能量，并不断地把电能转换成为热能，在转换过程中为人们作功。

通过实验得知，电流通过电阻时所产生的热量可以由下式来表示：

$$Q = kPt \quad (1-5)$$

式中 Q ：热量 千卡
 P ：电功率 千瓦
 k ：常数 $k=0.24$

这个关系式即是著名的楞次——焦耳定律，常数 k 的物理意义是：相当于电阻为 1 欧姆的导体中通过 1 安培电流时，每秒钟产生的热量。

例如一台 450 千瓦的电炉，它一个小时内将 450 度电转换成 388800 千卡热量。

$$Q = 0.24 \times 450 \times 3600 = 388800 \text{ 千卡}$$

在有功功率生产、传输及消费过程中，由于各类电气元件都有电阻，因此亦造成了电能转换热能，这就是有功损耗。无功功率在电力系统中往返流动同样也造成了相当可观的有功功率损耗，这也是本书拟讨论的课题之一。