



电力电子技术丛书

无功补偿与 电力电子技术

苏文成 金子康 等编著

机械工业出版社



DIANLI DIANZI JISU

电力电子技术丛书

无功补偿与电力电子技术

苏文成 金子康 等编著



机械工业出版社

本书是《电力电子技术丛书》之一。

本书简述了电力系统中功率因数的基本概念、电力电子技术对功率因数的影响，一般讨论了供用电系统正常工作时提高功率因数的措施，重点叙述在冲击负载下，利用晶闸管静止型无功功率补偿装置抑制电压闪变、提高功率因数的原理及该装置的基本结构，书中还简述了设置动力滤波器抑制谐波电流时，在其实用参数设计上需要考虑的问题。

本书可作为从事电力电子、电气自动化、用电及节电技术工作的初学者入门读物，也适用于具有中等专业知识的科技人员、技术工人扩大知识领域，同时也可供大专院校、中专院校有关专业师生参考。

电力电子技术丛书

无功补偿与电力电子技术

苏文成 金子康 等编著

★

责任编辑：严蕊琪 版式设计：胡金琰

封面设计：方·芬 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

★

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

★

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $5 \frac{1}{4}$ · 字数 134 千字

1989 年 7 月北京第一版·1989 年 7 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,330 · 定价：5.10 元

★

ISBN 7-111-01236-4/TM · 159

出版者的话

电力电子技术是以晶闸管为主的电力半导体器件及其应用的技术，也是融合“电力”、“电子”和“控制”于一体的技术。由于电力半导体器件具有效率高、控制性能好、体积小、重量轻、使用可靠等优点，它已广泛地应用于电力、冶金、矿山、化工、交通运输、机械、轻工等部门，成为节能最有成效的技术之一。

为了普及与推广电力电子技术，大力促进我国国民经济各部门的发展，在中国电工技术学会电力电子学会组织下，我们决定出版这套《电力电子技术丛书》。

这套丛书包括《电力半导体器件原理》、《电力半导体电路原理》、《电力电子技术与节能》、《直流电动机晶闸管调速系统》、《交流电动机晶闸管调速系统》、《晶闸管斩波器》、《无功补偿与电力电子技术》、《家用电器与电力电子技术》、《晶闸管交流电力控制器》、《电力半导体直流稳定电源》、《不间断供电系统》、《脉冲电镀和脉冲焊电源》等，将陆续出版。

电力电子学会及本丛书编委会对丛书的选题、组稿、审定稿付出了辛勤劳动，还有不少单位对编审稿工作给予了热忱关怀与帮助，在此表示深切的谢意。

机械工业出版社

前 言

电力电子技术的发展为供用电系统带来的不利后果之一是功率因数的降低，特别是用它组成的设备对某些大型、冲击型负载供电的情况下，在正常运行时，会反复地使负载的无功功率在一个很大的范围内变动。这不仅影响电能的质量，也使整个电网经济运行的效益受到一定的损失。本书试图从补偿无功功率的角度出发，叙述电网功率因数的基本概念和电力电子技术对功率因数的影响，介绍在正常情况下提高功率因数的一般措施和无功功率静止型补偿装置用于冲击负载下进行无功功率动态补偿的基本概念以及其结构等。后者在国内虽已有应用，但尚无书籍作系统而全面的论述，然而，在广大的电力、电力电子以及工业电气自动化初级技术人员中普及并提高这方面的知识是迫不及待的。

本书共三章，第一章主要由陕西机械学院张津同志编写，第二章主要由陕西机械学院余健明同志编写，第三章由西安电力整流器厂金子康高级工程师编写，最后由陕西机械学院苏文成教授统编全稿，并对部分章节做了订正补遗工作。全书由清华大学顾廉楚教授主审。

在编审过程中得到丛书编委会和参加审稿会同志的宝贵意见，谨在此表示感谢。

由于书中部分材料尚不够成熟，编写者的水平有限，如有缺点和错误，真诚希望广大读者给予批评指正。

编者

编委会成员

主任委员 顾廉楚

副主任委员 张明勋 苏文成 张为佐

陈守良 严蕊琪

委员（按姓氏笔划序）

卞敬明 孙流芳 李佑持 沈来仪

张立 张永生 张铁忠 周胜宗

秦祖荫 徐传骧

目 录

第一章 功率因数及无功功率	1
第一节 功率因数的意义及其对供电系统的影响	1
一、功率因数的意义	1
二、功率因数对供电系统的影响	2
三、无功功率经济当量	5
第二节 供电系统正常运行时的无功功率	6
一、无功功率的主要用户	6
二、减少无功功率需要量, 提高自然功率因数的方法	10
第三节 冲击负载下的无功功率	15
第四节 电力电子装置应用后对供电系统功率因数的影响	17
一、基本概念	17
二、单相桥式整流电路控制角 α 与功率因数的关系	19
三、三相半波整流电路考虑 γ 角时的功率因数	20
四、三相桥式全控整流电路的功率因数	21
五、提高功率因数的措施	25
第二章 正常工作下的功率因数补偿装置	33
第一节 功率因数补偿装置	33
第二节 补偿容量的选择及设置原则	38
一、电力系统中补偿装置容量的选择	38
二、工厂供电系统中无功功率补偿装置容量的选择及其设置	42
三、补偿装置的工作状态, 静电电容器的自动投切	53
第三章 大型电力电子装置的应用及无功功率的补偿	73
第一节 概述	73
第二节 静止型无功功率补偿装置的原理	74
一、饱和电抗器型静止无功功率补偿装置	77
二、晶闸管相控电抗 (TCR) 型静止无功功率补偿装置	86
三、晶闸管投切电容器 (TSC) 型静止无功功率补偿装置	102

四、(TSC + TCR)混合型静止无功功率补偿装置.....	109
第三节 谐波问题和滤波器.....	111
一、谐波概述.....	111
二、电源系统所允许的谐波的极限.....	113
三、滤波器.....	117
第四节 静止型无功功率补偿装置用晶闸管阀.....	129
一、晶闸管阀电流计算.....	129
二、晶闸管阀电压和晶闸管串联数的计算.....	132
三、晶闸管阀的过电压保护.....	135
四、触发系统.....	147
五、晶闸管元件故障报警系统.....	153
六、晶闸管阀的冷却.....	156
参考文献.....	159

第一章 功率因数及无功功率

第一节 功率因数的意义及其对供电系统的影响

一、功率因数的意义

在正弦交流电路内，电流和电源电压的相位关系与系统元件的阻抗参数和负载的性质有关。例如，当系统阻抗为纯电阻，负载也是纯电阻性质时，则电流与电压为同相位；当系统元件的阻抗为纯电感或纯电容，负载也是纯电感或纯电容性质时，则电流落后或超前于电压 90° ，这三种情况在电工学上通常可用相量表示(图 1-1)。

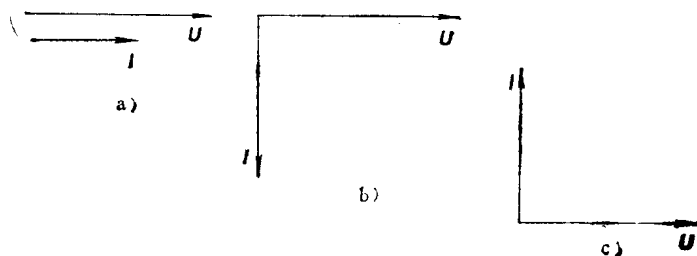


图1-1 电流与电压间的相量图

a) 电流与电压同相位 b) 电流滞后电压 90° c) 电流超前电压 90°

交流电路中电源送至用户的有功功率是电压和电流的乘积。

设瞬时电压 $u = \sqrt{2} U \sin \omega t$ ，电流 $i = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi)$ ，则瞬时功率为

$$\begin{aligned} P &= ui = 2 UI \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) \end{aligned}$$

当供电电压的周期为 T 时，在一个周期内有功功率的平均值为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi)] d\omega t$$

$$= UI \cos \varphi + 0 \quad (1-1)$$

平均功率的第二项为零时, 意味着这部分功率所消耗的能量只是在电源及负载间进行交换, 即不作有用的功。这种能量交换, 只有当系统中存在无功元件, 即感抗和容抗并必须积累和输出电磁能时, 才有必要。

在图 1-1 a 中, 电压与电流同相位时, 显然

$$P = KUI$$

这是纯电阻性负荷。

对图 1-1 b 及 c

$$P = 0$$

式中 K 表示与相数有关的系数。如在三相交流电路中, 当电压为线电压, 电流为线电流时, $K = \sqrt{3}$ 。

以上说明, 在不同供电系统中, 当电源电压和电流大小相同时, 有功功率的大小决定于电压和电流之间的夹角 φ , 即决定于功率因数 $\cos \varphi$ 值, φ 角越大, $\cos \varphi$ 值越小。

与 φ 角对应的正弦值 $\sin \varphi$ 和电压 U 电流 I 的乘积称为无功功率。

$$Q = KUI \sin \varphi \quad (1-2)$$

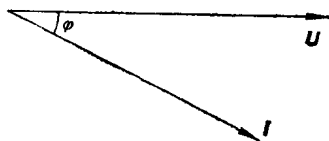


图 1-2 电流与电压间夹角为 φ 角时的相量关系

φ 角越大, 无功功率越大 (图 1-2)。因此, 如果要提高功率因数 $\cos \varphi$, 必须从减小 φ 角, 即减少无功功率的需要量上下手。

二、功率因数对供电系统的影响

从式 (1-1) 及 (1-2) 可以得出

$$S = \sqrt{(KUI \cos \varphi)^2 + (KUI \sin \varphi)^2} = KUI$$

或

$$I = \frac{S}{KU} \quad (1-3)$$

从图 1-3 可以看出, 如果 P 保持不变, 无功功率 Q 增至 Q' , 将使视在功率由 S 增至 S' , 从而使流过供电系统的电流增加, 这将对系统产生以下的影响。

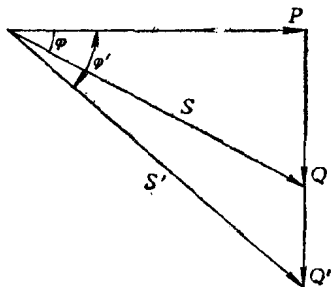


图1-3 有功功率 P 相同而无功功率不同时的视在功率

(1) 总电流增加会使电力系统中的元件, 如变压器、电气设备、导线等容量增大, 使用户内部的起动控制设备、量测仪表等规格、尺寸增大, 因而使投资费用增大。

(2) 在传送同样有功功率情况下, 总电流的增大, 使设备及线路的损耗增加, 即

$$\Delta P = 3I^2 R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \Delta P + \Delta P_Q \quad (1-4)$$

式中 ΔP_Q 系由于无功功率在系统通过所产生的有功功率损耗值, 它与通过的无功功率的平方成正比。

(3) 线路及变压器的电压损失增大, 即

$$\Delta U = \frac{PR + Qx}{U} = \Delta U_R + \Delta U_Q \quad (1-5)$$

(4) 对电力系统的发电设备来说, 无功电流的增大, 对发电机转子的去磁效应增加, 电压降低, 如过度增加励磁电流, 则使转子绕组超过允许温升。为了保证转子绕组正常工作, 发电机就不允许达到预定的出力。此外, 原动机的效率是按照有功功率衡量的, 当发电机发出的视在功率一定时, 无功功率的增加, 会导致原动机效率的相对降低。

目前, 常用的功率因数有瞬时功率因数与加权平均功率因数。

由于功率因数随负荷的运行情况而变化, 所以利用功率因数表测定的功率因数只能用来判断无功功率的需要量是否稳定, 以便分析变化的原因, 采取相应的措施。例如, 对于冲击负荷, 只要观测并记录瞬时功率因数, 便可在动态工作情况下, 作为选择无功功率补偿容量的参考依据。

在正常工作情况下, 往往考虑的是加权平均功率因数。加权平均功率因数是指某一规定时间内功率因数的平均值。即

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \cos \arctg \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q dt}{\int_{t_1}^{t_2} P dt} = \cos \arctg \frac{Q_{Pi}}{P_{Pi}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{V}{W}\right)^2}} \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中 $W = P(t_2 - t_1)$ ——某段时间 t 内有功电度表指示数;

$V = Q(t_2 - t_1)$ ——某段时间 t 内无功电度表指示数。

加权平均功率因数不能描述功率因数随时间变化的特点。例

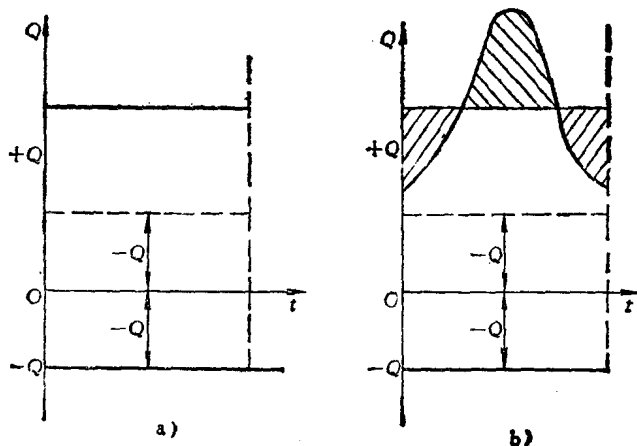


图1-4 不同无功功率负荷但具有相同平均功率因数的示意图

如，两个加权平均功率因数相同的用户，其无功功率的负荷曲线差别可能很大（图 1-4），因此，加权平均功率因数虽高的用户，其电压偏移以及装置中功率及电能损失可能反而大。

为了提高功率因数，必须减少无功功率需要量，减少无功功率需要量的方法首先是改进电气设备的运行方式，这种措施称作提高自然功率因数，是最经济合理的办法。但是，仅仅提高自然功率因数显然满足不了电力部门的技术要求，所以必须进行人工补偿。

三、无功功率经济当量

由式（1-4）可以得出

$$\Delta P_Q \approx \frac{Q^2}{U^2} R$$

设本结点设置无功功率补偿装置 Q_B ，则无功功率引起供电系统的有功功率损失 $\Delta P_Q'$ 为

$$\Delta P_Q' \approx \frac{(Q - Q_B)^2}{U^2} R$$

于是，在两种不同情况下有功功率损失的差值为

$$\Delta P = \frac{R}{U^2} [2QQ_B - Q_B^2] - \Delta P_B \quad (1-7)$$

ΔP_B 为补偿装置发出 $Q_B \text{ kvar}$ 无功功率时耗用的有功功率

$$k_q = \frac{\Delta P}{Q_B} = \frac{R}{U^2} (2Q - Q_B) - \frac{\Delta P_B}{Q_B} \quad (1-8)$$

例：设三相供电线路的无功负荷 $Q = 1000 \text{ kvar}$ ，采用合理安排负载的方法使无功功率需要量减少 200 kvar ，如线路电阻 $R = 1.4 \Omega$ ，电压为

$$10 \text{ kV}, \text{ 则 } k_q = \frac{2 \times 1000 \times 1.4 \times 10^{-3}}{10^2} - \frac{200 \times 1.4 \times 10^{-3}}{10^2} = 0.0252$$

kW/kvar 。

实际上这样计算求出的经济当量没有考虑到由于无功功率减少而引起电压升高，从而导致用电设备无功功率需要量增加，以及引起系统中有功功率损失减少等因素，用解析的方法来准确考虑这些因素是很困难的。国外文献中提出按照电源与负荷之间的距

离及变压等级大致计算出 k_q 约在 $0.02 \sim 0.1 \text{ kW/kvar}$ 之间, 对于由发电厂直配的用户其 k_q 最小, 约为 $0.02 \sim 0.04 \text{ kW/kvar}$, 经过先升压、后降压两级变压的用户, 其 k_q 为 $0.05 \sim 0.07 \text{ kW/kvar}$, 经过升压、降压、再降压三级变压的用户其 k_q 为 $0.08 \sim 0.1 \text{ kW/kvar}$ 。

第二节 供电系统正常运行时的无功功率

一、无功功率的主要用户

无功功率的主要用户为感应电动机, 它取自系统的无功功率量约占全部无功功率的 $60 \sim 65\%$ 。其次为变压器消耗的无功功率也很多, 约占 $20 \sim 25\%$, 约有 $10 \sim 20\%$ 的无功功率目前是由整流器、电抗器、架空电力线路等消耗的, 因此可以得出结论, 无功功率绝大部分消耗在感应电动机及变压器中。

1. 感应电动机

感应电动机消耗的无功功率与其本身的额定参数和负载系数有关, 在额定电压下, 电动机为额定负载时, 其无功功率的需要量为

$$Q_{dL} = \frac{P_{dL}}{\eta_{dL}} \tan \varphi_{dL} \quad (1-9)$$

式中 P_{dL} ——电动机的额定容量 (kW);

η_{dL} ——电动机在额定负载下的效率;

$\tan \varphi_{dL}$ ——电动机额定功率因数角的正切。

电动机在空载时消耗的无功功率为

$$Q_{d0} \approx \sqrt{3} U_e I_{d0} \quad (1-10)$$

式中 U_e ——电网的额定电压 (kV);

I_{d0} ——电动机的空载电流 (A)。

$\cos \varphi_{dL} = 0.91 \sim 0.93$ 的感应电动机空载时所需的无功功率约为全部无功功率需要量式 (1-9) 的 50% , 而 $\cos \varphi_{dL} = 0.77 \sim 0.79$ 的电动机, 其 Q_{d0} 可达 70% 左右。

电动机空载无功功率可由下式近似地计算。

$$Q_{d0} = \frac{P_{de}}{\eta_{dr}} m \quad (1-11)$$

m 值可以用下式计算。

$$m = \frac{I_{d0}}{I_{de} \cos \varphi_{de}} = \operatorname{tg} \varphi_{de} - \frac{1}{\frac{i}{\cos \varphi_{de} \sin \varphi_{qd}} - \operatorname{tg} \varphi_{de}} \quad (1-12)$$

$$\sin \varphi_{qd} \approx \sqrt{1 - \left(\frac{2 \cos \varphi_{de} \mu_{qd}}{k_{qd}} \right)^2}$$

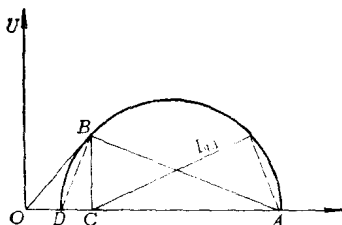
式中 I_{d0} —— 电动机的空载电流；

I_{de} —— 电动机的额定电流；

i —— 起动电流倍数；

μ_{qd} —— 起动转矩倍数；

$\sin \varphi_{qd}$ —— 起动时的功率因数角的正弦值。



附图1-1 感应电动机的简化圆图

图中：

OA —— 假想的短路电流 I_d ；

OB —— 感应电动机的额定电流 I_{eD} ；

OD —— 感应电动机的空载电流 I_{0D} ；

BC —— 电动机额定电流的有功部分 I_{eD} ；

DC —— 电动机额定工作状况时无功电流的增值 αI_{0D} ；

φ_e —— 电动机额定功率因数角；

$$\alpha = DC/OD$$

从直角三角形 ABD 可得

$$I_{aD}^2 = 2I_{0D}[I_d - (I_{0D} + \alpha I_{0D})]$$

考虑到 $I_d/I_{eD} = 5 \sim 7$, $I_{0D}/I_{eD} = 0.3 \sim 0.4$, $\alpha = 0.3 \sim 0.4$, 上式可写为

$$I_{aD}^2 = \alpha I_{0D}[I_d - I_{0D}]$$

其误差不超过 1%。

从三角形 OBC 可得

$$I_{0D} + \alpha I_{0D} = I_{0D} + \frac{I_{aD}^2}{I_d - I_{0D}} = I_{aD} \operatorname{tg} \varphi_e$$

即

$$\operatorname{tg} \varphi_e = \frac{I_{0D}}{I_{aD}} + \frac{I_{aD}}{I_d - I_{0D}}$$

令

$$\frac{I_{0D}}{I_{aD}} = m$$

则

$$\operatorname{tg} \varphi_e = m + \frac{1}{\frac{I_d}{I_{aD}} - m}$$

已知

$$k_{qd} = I_{qd}/I_{eD} \quad \text{即} \quad I_{qd}/\sin \varphi_{qd} = k_{qd} I_{eD}/\sin \varphi_{qd}$$

则

$$\operatorname{tg} \varphi_e = m + \frac{1}{\frac{k_{qd}}{\cos \varphi_e \sin \varphi_{qd}} - m}$$

解关于 m 对于 $\operatorname{tg} \varphi_e$ 的式子, 并用牛顿二项式原理 $(1 + 1/x)$ 代替 $(1 + x)^{1/2}$, 可得

$$m = \operatorname{tg} \varphi_e - \frac{1}{\frac{k_{qd}}{\cos \varphi_e \sin \varphi_{qd}} - \operatorname{tg} \varphi_e}$$

在额定负载下, 感应电动机所需无功功率的增值为

$$\Delta Q_{de} = Q_{de} - Q_{d0} \approx \frac{P_{de}}{\eta_{de}} \operatorname{tg} \varphi_{de} - \sqrt{3} U_e I_{d0}$$

如果感应电动机的负载低于额定负载, 则在该负载下无功功

率的增量为

$$\Delta Q = \Delta Q_{de} k_z^2$$

式中 $k_z = \frac{P_d}{P_{de}}$ 称为电动机的负载系数,

在此情况下, 电动机的功率因数为

$$\cos \varphi_d = \frac{P_d}{S_d} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_{d0} + \Delta Q_{de} k_z^2}{P_{de} k_z} \right)^2}} \quad (1-13)$$

2. 变压器

对于变压器来说, 它消耗的无功功率也分为两部分: 空载无功功率及在负载下变压器无功功率损失的增量。

变压器的空载无功功率损失由它的空载电流对额定电流的百分数表示, $I_{b0}\%$ 列于变压器的产品目录中。

$$\frac{I_{b0}}{I_{be}} \times 100\% = \frac{I_{b0}}{I_{be}} \frac{\sqrt{3} U_{be}}{\sqrt{3} U_{be}} = \frac{Q_{b0}}{S_{be}}$$

即

$$Q_{b0} = \frac{I_{b0}\%}{100} S_{be} \quad (1-14)$$

变压器在额定负载下消耗的无功功率用产品目录上列的短路电压百分数表示。即

$$\frac{\Delta U_d\%}{100} \approx \frac{\sqrt{3} I_{be} X}{U_e} \frac{\sqrt{3} I_{be}}{\sqrt{3} I_{be}} = \frac{3 I_{be}^2 X}{S_{be}} = \frac{\Delta Q_{be}}{S_{be}}$$

即

$$\Delta Q_{be} = \frac{\Delta U_d\%}{100} S_{be} \quad (1-15)$$

在任意负载时,

$$\Delta Q_b = \Delta Q_{be} \left(\frac{S}{S_{be}} \right)^2 \quad (1-16)$$

无论是电动机, 还是变压器, 它们的无功功率需要量都决定于它们的结构参数、使用材料和运行时的负载情况。对用户来