

功率因数补偿节电技术

节电技术丛书



江西科学技术出版社

节电技术丛书

功率因数补偿节电技术

杨应群 陈晓华 主编

江西科学技术出版社出版

(南昌市第四交通路铁道东路)

江西省新华书店发行 江西印刷公司印刷

开本 787×1092 1/32 印张6.875 插页1 字数15万

1986年2月第1版 1986年2月第1次印刷

印数1—6,720

统一书号: 15425.8

定价: 1.20元

内 容 提 要

本书从无功功率和功率因数的基本概念出发，阐述了厂矿企业无功功率补偿的意义和方法，着重论述了并联电容器的基本性能、补偿原理、常用计算及最佳补偿的确定。对于并联电容器补偿装置的选用、保护、维修及控制（尤其是自动控制）也做了详细介绍。本书叙述深入浅出，内容简明实用，是一本无功功率补偿节电方面较好的参考材料，可供广大厂矿企业从事节电工作的技术人员和高中以上文化程度的工人使用。

前 言

电力是重要的能源，节电是节能的一项重要内容。随着工农业生产的飞跃发展，人们生活水平的迅速提高，电力负荷将与日俱增，电力供需矛盾将会异常突出。这就迫使广大厂矿企业的节电技术改造势在必行。为适应这种形势，推动节电工作，我们编辑了这套节电技术丛书，以满足广大电力工作者的需要。

这套丛书现有《功率因数补偿节电技术》、《电动机节电运行》、《交流接触器无声节电运行》、《电焊机节电技术》等四册，有关其他方面的节电技术，以后将根据需要陆续出版。

本丛书的作者，多数是工作在节电第一线的工程技术人员，在长期的实践中，对于节电技术的理论、计算和应用，节电装置的设计、运行和维修，进行了摸索和探讨，并试图总结出一套既有理论又有实践，适合我国厂矿企业应用的节电技术资料。但是，由于条件和水平的限制，本丛书要达到这个目的，仍有很大距离，至于错误之处，更是难以避免。为此，恳请广大读者批评指正，以期不断提高和完善。

本丛书由杨应群、陈晓华主编。参与编写工作的有刘立于、艾起贵、龚秋声、曾军文、王令老、尚宣文、胡刚、吴永福、肖昌极、张秉政、赵凌云、李建。负责审校的是雷良钦、王雨苍、钱梓弘、胡师铨、季国瑜、周世和和曾宪炳等同志。

在丛书编写过程中，承蒙江西省科学技术委员会、江西省科学技术情报研究所、江西省经委三电办公室和南昌市三电办公室等单位，以及袁居仁、宗瑞云、邓仁和、何青邦、潘刚、王宪章等同志大力支持和热情帮助，在此一并致以谢意。

编 者

1984年12月

目 录

第一章 功率因数及其对电力系统的影响	(1)
§ 1—1 功率三角形与功率因数	(1)
§ 1—2 工业企业常用的功率因数	(4)
§ 1—3 功率因数对电力系统的影响	(8)
§ 1—4 无功功率经济当量与常用生产设备的功率因数	(17)
第二章 功率因数的补偿措施	(20)
§ 2—1 提高自然功率因数	(20)
§ 2—2 功率因数的人工补偿	(45)
第三章 并联电容器及其基本性能	(53)
§ 3—1 电力电容器的一般性能	(53)
§ 3—2 并联电容器的基本特点	(66)
§ 3—3 并联电容器的主要技术参数	(82)
第四章 并联电容器的作用原理及其对功率因数的最佳 补偿	(89)
§ 4—1 并联电容器补偿功率因数的作用原理	(89)
§ 4—2 电容器对功率因数的最佳补偿	(93)
第五章 并联电容器补偿装置及其选用	(104)
§ 5—1 并联电容器补偿装置	(104)
§ 5—2 并联电容器补偿装置的选用	(124)
第六章 并联电容器功率因数补偿装置的保护	(151)
§ 6—1 并联电容器补偿装置对保护的要求	(151)
§ 6—2 并联电容器补偿装置正常运行时的保护	(152)

§ 6—3	并联电容器补偿装置的故障保护	(155)
§ 6—4	电容器组的各种保护装置的应用范围和优缺点的比 较	(179)
第七章	功率因数自动补偿控制器及其装置	(181)
§ 7—1	概述	(181)
§ 7—2	功率因数自动补偿控制器的基本工作原理	(183)
§ 7—3	GZB—6B型功率因数自动补偿控制装置	(203)
第八章	并联电容器补偿装置的安装、运行与维修	(209)
§ 8—1	并联电容器补偿装置的安装	(209)
§ 8—2	并联电容器补偿装置的运行	(210)
§ 8—3	并联电容器补偿装置的维修	(211)

第一章 功率因数及其对 电力系统的影响

§1—1 功率三角形与功率因数

一、有功功率和无功功率

工业企业广泛使用的电气设备，如交流异步电动机、交流电焊机、交流接触器和各种各样的变压器等，一般都是属于电感性的用电负载。要使这些用电设备能够正常运行，需要先建立交变电磁场，通过电磁感应，依靠磁场来转换和传递能量。在交流电路中，当接上这些电气设备作为用电负载时，由电源供给负载的电功率可以分成两部分：一部分是使电气设备能够正常运行的电功率，也就是将电能转换成其他形式能量的功率，叫做有功功率；另一部分是电能电源和电感性用电负载之间交替往返的电功率，叫做无功功率。这些无功功率并不作功，但却是电感性用电设备通过电磁感应，用来建立交变电磁场进行能量转换所不可缺少的功率，并不是无用的电功率。

二、功率三角形

有功功率用 P 表示，单位为瓦 (W) 或千瓦 (KW)；无功功率用 Q 表示，单位为乏 (VAR) 或千乏 (KVAR)；有功功率 P 和无功功率 Q 的向量和称为视在功率，用符号 S 表示，单位为伏安 (VA) 或千伏安 (KVA)。由有功功率 P 、

无功功率 Q 与视在功率 S 所组成的直角三角形。叫做功率三角形，如图 1—1 所示。 S 是功率三角形的斜边， P 与 Q 是功率三角形的两条直角边。从功率三角形可得

$$P = S \cos \varphi \quad \text{或} \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}$$

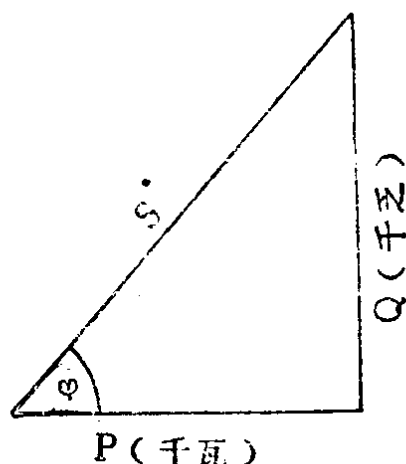


图 1—1 功率三角形

三、功率因数

在功率三角形中，有功功率 P 和视在功率 S 的比值 $\cos \varphi$ ，称为功率因数，角度 φ 称为功率因数角。常用的电感性用电设备，如交流异步电动机等，它们的功率因数都是小于 1 的。它们在三相交流电路中从交流电源所取用的有功功率为

$$P = \sqrt{3} IU \cos \varphi$$

式中： U —电网电压(伏)；

I —负载电流(安)；

$\cos \varphi$ —功率因数。

如果要求负载在一定的电网电压下取用一定的有功功率 P ，那么，当 $\cos \varphi$ 低时，就需要电源供给较大的电流，这将使供电线路中由电阻所引起的能量损耗增大。另一方面，从电源

的角度来看，发电机所给出的有功功率是由发电机的额定电压、额定电流和负载的总功率因数所决定的。如果发电机在额定电压下，供给负载额定电流，并在负载的总功率因数 $\cos \varphi = 1$ 的情况下运行，那么这台发电机的容量就被人们认为充分地利用与发挥了。因为只有在这种情况下，该发电机才能产生出与其额定视在功率相等的（亦即最大的）有功功率，即 $P = S \cos \varphi = S$ ，此时的无功功率为

$$Q = S \sin \varphi = 0$$

由于有功功率总是小于或等于视在功率，所以功率因数也只能小于或等于 1。功率因数的高低与无功功率的大小有关。负载总功率因数的高低，反映了用电设备的合理使用状况、电力的利用程度和用电的科学管理水平。

在这里，应该提醒读者注意的是，功率因数有超前和滞后之分。它们取决于有功功率 P 和无功功率 Q 两者输送的方向。取某一负荷为基准点，如果 P 与 Q 的输送方向相同，则在此点的功率因数为滞后；如果 P 与 Q 两个功率分量的输送方向相反，则在此点的功率因数为超前。比如，并联电容器是一种无功功率源，所以其功率因数总是超前的。异步电动机的功率因数则是滞后的，它需要将有功功率 P 和无功功率 Q 同时输入（即输送方向相同）。过激同步电动机能供给系统无功功率，而其本身也同时需要有功功率的输入，但 P 与 Q 的输送方向相反，所以功率因数是超前的。

在实际的电力系统中，即使有一些超前功率因数的负载（如过激同步电动机等），但系统中的总功率因数仍往往处于滞后状态。

§1—2 工业企业常用的功率因数

工业企业的功率因数，通常随着负荷的变化与电网电压的波动而经常不断地发生变化。因此，为了满足供电部门和用户的要求，计算无功补偿容量，必须先充分了解有关功率因数的几个概念。

一、瞬时功率因数

在某一瞬间由功率因数表（相位计）读取的功率因数，称瞬时功率因数。它也可根据电流表、电压表及功率表在同一瞬间的读数用下式计算：

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_i I_i}$$

式中：P—功率表读数（千瓦）；

U_i —电压表读数（千伏）；

I_i —电流表读数（安）。

瞬时功率因数是随负载情况和电压高低而变化的，它用来判断工厂的无功功率需要量是否稳定，分析影响功率因数变化的各项因素，以便在运行上采取相应措施，并为日后提供设计参考依据。

二、均功率因数

以有功电能和无功电能为参数计算而得的功率因数，称为均功率因数。它是指某一规定时间内功率因数的平均值。其计算公式如下：

$$\cos \varphi_j = \frac{W_p}{\sqrt{W_p^2 + W_q^2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_Q}{W_P}\right)^2}}$$

式中： $\cos \varphi_j$ —均权功率因数；

W_P —有功电能（千瓦·小时）；

W_Q —无功电能（千乏·小时）。

供电部门对已经投产企业调整电费的月平均功率因数，即是把企业一个月中有功电度表与无功电度表所记录的读数 W_P 和 W_Q ，代入上式计算而得出来的。

三、自然功率因数

凡未装设人工补偿装置时的功率因数，称为自然功率因数。自然功率因数有瞬时值和均权平均值两种。

四、最大负荷时的功率因数

设最大负荷时的功率因数 $\cos \varphi_1$ 、 $\cos \varphi_2$ ，根据功率因数的定义

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

可分别写出：

补偿前最大负荷时的功率因数

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_j}{S_j} = \frac{P_j}{\sqrt{P_j^2 + Q_j^2}}$$

补偿后最大负荷时的功率因数

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_j}{S_j'} = \frac{P_j}{\sqrt{P_j^2 + (Q_j - Q_c)^2}}$$

上两式中：

P_j —全企业的有功计算负荷（千瓦）；

Q —全企业的无功计算负荷 (千乏);

Q_c —全企业的无功补偿容量 (千乏);

S_p, S'_p —全企业补偿前后的视在计算负荷 (千伏安)。

五、总平均功率因数

补偿前总平均功率因数 (亦称自然总平均功率因数)

$$\begin{aligned}\cos \varphi_{1p} &= \frac{P_p}{S_p} = \frac{P_p}{\sqrt{P_p^2 + Q_p^2}} \\ &= \frac{\alpha P_i}{\sqrt{(\alpha P_i)^2 + (\beta Q_i)^2}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\beta Q_i}{\alpha P_i}\right)^2}}\end{aligned}$$

补偿后总平均功率因数

$$\cos \varphi_{2p} = \frac{P_p}{S'_p} = \frac{\alpha P_i}{\sqrt{(\alpha P_i)^2 + (\beta Q_i - Q_c)^2}}$$

上两式中:

P_i, Q_i, Q_c —意义同前;

S_p, S'_p —全企业补偿前、后的视在平均计算负荷 (千伏安);

P_p —全企业的有功平均计算负荷 (千瓦), $P_p = \alpha P_i$;

Q_p —全企业的无功平均计算负荷 (千乏), $Q_p = \beta Q_i$;

α —日平均有功负荷系数, $\alpha = \frac{\text{月平均负荷}}{\text{月最大负荷}}$;

β —月平均无功负荷系数, $\beta = \frac{\text{月无功平均负荷}}{\text{月无功最大负荷}}$ 。

α 和 β 是反映工业企业有功及无功负荷变化规律的一个参

数。其值越高，说明负荷曲线平稳，负荷变动越小；其值越低，说明负荷曲线起伏大，负荷变动越大。但 α 和 β 总是小于 1 的，且除了大量使用电焊设备的工厂或车间外， β 值一般较 α 值高 10~15%。 α 和 β 的具体计算参见常用的工厂电气设计手册。

在这里，着重讨论一下补偿后的总平均功率因数 $\cos\varphi_{2P}$ 。它是在采用了相应的补偿措施后，全企业的平均计算负荷与视在平均计算负荷之比。若考虑到全企业在一个月内的实际工作小时数，则 $\cos\varphi_{2P}$ 也可用以下形式来表达：

$$\begin{aligned}\cos\varphi_{2P} &= \frac{P_P}{S_P'} = \frac{P_P t}{S_P' t} \\ &= \frac{\alpha P_j t}{\sqrt{(\alpha P_j)^2 t^2 + (\beta Q_j - Q_c)^2 t^2}} \\ &= \frac{W_P}{\sqrt{W_P^2 + W_Q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_Q}{W_P}\right)^2}}\end{aligned}$$

式中， t —全企业一个月的实际工作小时数（小时），

W_P —全企业一个月的有功电能消耗量（千瓦·小时），

$$W_P = \alpha P_j t;$$

W_Q —全企业一个月的无功电能消耗量（千乏·小时），

$$W_Q = (\beta Q_j - Q_c) t。$$

功率因数 $\cos\varphi_{2P}$ ，与供电局用有功电能和无功电能计算的均功率因数 $\cos\varphi_1$ 是统一的。只不过 $\cos\varphi_{2P}$ 是站在用户设计计算的角度，而 $\cos\varphi_1$ 则是站在供电部门调整电费的角度来计算的。前者适用于正在进行设计的工业企业，后者适用于正在生产的工业企业。

为此，要注意的是，进行企业供电设计时，应以补偿前、

后的总平均功率因数是否达到设计规范要求值来计算补偿容量，而不能以最大负荷时的功率因数 $\cos\varphi_1$ 和 $\cos\varphi_2$ 来计算。否则，往往会使所计算的无功补偿容量偏小，造成企业变电所投入运行后，处于经常受到罚款的被动局面。

§1—3 功率因数对电力系统的影响

除了电阻性照明灯泡、电阻炉等电阻性负载的功率因数接近于1以外，工厂企业中的电气设备，如变压器、交流异步电动机、电焊机、整流器和感应电炉等，都属于电感性负载。这些大量的感性负载是电力系统以及用户内部消耗无功功率的主要方面。据统计，整个工厂企业用电设备中感应电动机占60%以上，其耗用的无功功率总和一般也占全厂总无功功率的60%以上。输配电设备中的各种变压器，所耗用的无功功率总和亦可达到全厂企业总无功功率的20%左右。其余的无功功率主要消耗在各种交流控制设备、整流器和架空电力线路等具有交流电抗的用电设备中。

当有功功率的需要量一定时，工业企业的总功率因数偏低，导致无功功率的需要量增大，将对电力系统产生以下一系列的不良影响：

一、使电力系统中的设备和元件容量和数量增加

功率因数的降低，将会使电力变压器、开关和导线等电气设备、材料的容量和数量增加，同时使工业企业内部的起动控制设备、量测仪表等规格和尺寸增大，总的结果是耗用有色金属和黑色金属的数量增加，将严重影响企业的经济效益。

从图1—1可知，在功率三角形中

$$S=\frac{P}{\cos \varphi}$$

$$Q=\sqrt{S^2-P^2}$$

由以上两式可知，在企业需要的有功功率P一定的情况下，功率因数cosφ降低，将导致电力系统的视在功率S和无功功率Q的增加。

设P=1，则cosφ在不同值时，相应的视在功率的增加倍数见表1—1所列。

表 1—1 S 与 cosφ 关系表

cosφ	1.00	0.98	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.60	0.50	0.40
S	1.00	1.02	1.05	1.11	1.18	1.25	1.33	1.43	1.67	2.00	2.50

二、使输电线路的功率损耗增加

工业企业的变、配电电气设备，都是要求在一定的额定电压下运行的。当cosφ降低时，若仍要保证它们在一定的额定电压下取用一定的有功功率P，则输电线路的功率损失势必增加。以三相电源为例，则

$$\begin{aligned} \Delta P &= 3I^2R \times 10^{-3} \\ &= 3\left(\frac{P}{U \cos \varphi}\right)^2 R \times 10^{-3} \\ &= 3\left(\frac{P}{\cos \varphi}\right)^2 \frac{R}{U^2} \times 10^{-3} \\ &= 3\frac{S^2}{U^2} R \times 10^{-3} \\ &= \frac{3(P^2 + Q^2)R}{U^2} \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{3P^2R}{U^2} \left(1 + \frac{Q^2}{P^2} \right) \times 10^{-3} \\
 &= \frac{3P^2R}{U^2} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) \times 10^{-3} \\
 &= \frac{3P^2R}{U^2 \cos^2 \varphi} \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

式中：ΔP—输电线路的有功功率损耗（千瓦）；

I—线路输电电流（安）；

R—线路每相电阻（欧）；

P—线路输送的有功功率（千瓦）；

Q—线路输送的无功功率（千乏）；

cosφ—线路负荷（企业）的功率因数。

从上式可知，输电线路有功功率损失 ΔP 与功率因数 cosφ 的平方成反比。当企业的功率因数 cosφ 由 0.8 下降到 0.6 时，铜损将会增加一倍。当线路输送的有功功率 P 一定时，不同功率因数下对应的铜损百分数，见表 1—2 所列。

表 1—2 各种 cosφ 下的铜损百分数

cosφ	铜损百分数(%)	cosφ	铜损百分数(%)
1.0	100	0.80	156
0.95	111	0.70	204
0.90	123	0.60	278
0.85	138	0.50	400

三、使输电线路的电压损耗增加

从表 1—1 可知，企业的功率因数降低，无功功率就会增