

节电技术

怎样提高工厂企业的功率因数

林 光

福建科学技术出版社

内 容 提 要

本书介绍的是节电技术的一个重要方面——工厂企业用电功率因数的提高问题。全书共分七章：第一、二章介绍了功率因数和无功功率的基本概念以及提高功率因数的意义；三至七章详细介绍了提高功率因数的各种主要措施以及部分电路实例。

本书内容结合生产实际，通俗易懂。可供工厂企业的电气技术人员、电工和从事节电工作的管理人员学习参考。

节 电 技 术

怎样提高工厂企业的功率因数

林 光编著

*

福建科学技术出版社出版

(福州得贵巷27号)

福建省新华书店发行

福建新华印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/32 4.687印张 101千字

1982年12月第1版

1982年12月第1次印刷

印数：1—10,000

书号：15211·27 定价：0.40元

前 言

提高工厂企业的功率因数是充分发挥现有发供电设备的供电能力,降低电力损耗,保证我国现代化建设用电需要的一项重要重要的节电措施,

实践证明,采用“功率因数自动补偿装置”、“异步电动机轻载自动降压”、“交流接触器直流控制”、“电焊机空载自动断电装置”等提高功率因数的技术措施是具有相当显著的节电效果的。

为了配合工厂企业节电技术革新活动的深入开展,根据国内近年来提高功率因数的经验,参考国外有关的节电理论,并结合本人从事节电工作的体会,对提高功率因数的原理和各种方法进行比较系统的阐述。本书力求内容结合生产实际,深入浅出,尽量避免繁琐的数学公式的推导,以便适应从事节电工作的广大读者阅读,并希望通过它能对国内各工厂企业普遍提高功率因数有所助益。

本书在编写过程中,得到了福建省交通厅、福建省交通科学技术研究所和福建省上游船舶修造厂等单位的领导和有关同志的大力支持;在审稿过程中,承蒙福州大学项国波、林汀官同志和福建省供电局张公健同志及其他同志的热心指导和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,经验不足,书中难免存在缺点和错误,希望读者给予批评指正。

编 著 者

目 录

第一章	提高功率因数的重要意义	(1)
§ 1—1	交流电的基本概念	(1)
§ 1—2	无功功率和功率因数	(4)
§ 1—3	提高功率因数的重要意义	(7)
§ 1—4	无功功率的经济当量	(9)
§ 1—5	功率因数的规定值	(12)
第二章	影响功率因数的主要因素	(16)
§ 2—1	无功功率的主要耗用设备	(16)
§ 2—2	供电电压和频率的变化对无功功率的影响	(21)
§ 2—3	无功功率和功率因数的计算	(23)
第三章	提高用电设备的自然功率因数	(29)
§ 3—1	正确选择交流异步电动机的容量	(29)
§ 3—2	提高异步电动机的检修质量	(33)
§ 3—3	在新安装的生产机械上采用同步电动机	(37)
§ 3—4	采用硅整流器或可控硅整流器 作为直流电源	(44)
§ 3—5	供电变压器容量的选择和经济运行方式	(45)
第四章	采用移相电容器来提高功率因数	(51)
§ 4—1	工作原理	(51)
§ 4—2	移相电容器的结构和型号	(52)

§4—3 移相电容器的装设方式·····	(54)
§4—4 移相电容器容量的确定·····	(55)
§4—5 移相电容器组的自动控制·····	(58)
第五章 异步电动机同步化·····	(75)
§5—1 工作原理·····	(75)
§5—2 同步化的适用范围·····	(79)
§5—3 转子接线方式的选择·····	(84)
§5—4 励磁电路方案的选择·····	(89)
§5—5 保护电路和指示电路·····	(91)
§5—6 电路实例·····	(93)
第六章 异步电动机轻载自动降压运行·····	(98)
§6—1 工作原理·····	(99)
§6—2 降压运行的适用范围·····	(101)
§6—3 控制电路·····	(107)
§6—4 电路实例·····	(110)
第七章 提高功率因数的其他措施·····	(121)
§7—1 电焊机空载自动断电装置·····	(121)
§7—2 交流接触器直流控制·····	(129)
附表1 由 $\text{tg}\varphi$ 查 $\cos\varphi$ 的换算表·····	(140)
附表2 由 $\cos\varphi_1$ 提高到 $\cos\varphi_2$ 所需移相电容器 的容量表·····	(140)
主要参考资料·····	(141)

第一章 提高功率因数的重要意义

§1—1 交流电的基本概念

目前，在工厂企业中所用的电力多半为交流电，也就是大小和方向都随时间作周期性变化的正弦交变量。

在交流电路中，电动势、电压和电流都随时间作周期性变化。它们在某一瞬时的数值称为瞬时值，其中最大的瞬时值称为最大值（幅值），可以用下列式子表示。

$$e = E_m \sin \omega t \quad (1-1)$$

$$u = U_m \sin \omega t \quad (1-2)$$

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1-3)$$

式中 e 、 u 和 i 是电动势、电压和电流的瞬时值； E_m 、 U_m 和 I_m 则为它们的最大值； ω 为角频率。

角频率 ω 和频率 f 的关系为

$$\omega = 2\pi f \quad (1-4)$$

为了计算方便，交流电的大小通常用有效值来表示，即用热效应相同的直流电的数值来表示交流电的大小。交流电的有效值和最大值的关系是

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \quad (1-5)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (1-6)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (1-7)$$

式中 E 、 U 和 I 分别是电动势、电压和电流的有效值。

各种电气设备的额定电压和额定电流都是指有效值而言，而一般交流电压表和交流电流表在交流电路中测得的数值也都是有效值。

交流正弦电动势随时间变化的曲线如图1—1 (b)所示。交流电完成一次周期性变化所需要的时间 T 称为交流电的周期（单位为秒）；而电流在每秒钟内完成周期性变化的次数称为交流电的频率 f （单位为周/秒，即赫芝，简称赫）。频率和周期在数值上互成倒数，即

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{或} \quad T = \frac{1}{f}$$

我国及其他多数国家发电厂发出的交变电流，其频率都是50赫兹，这通常又称“工频”。也有些国家是采用频率为60赫兹的。

当几个同频率的正弦交变量要进行相加或相减时，采用上述三角函数表示形式进行运算是很麻烦的，而采用矢量表示法却很方便。

如图1—1 (a) 所示，通过直角坐标原点 O 作一长度等于正弦交变量最大值的矢量，此矢量与横轴正方向的夹角为 α ($\alpha = \omega t$)。令矢量以正弦交变量的角速度 ω 绕原点 O 反时针方向旋转，在任一瞬时，这个旋转矢量在纵轴上的投影即等于正弦交变量的瞬时值。在此图中表示一个正弦电动势 $e = E_m \sin(\omega t)$ 。在图1—1 (b) 中表示的是这个投影（即交流正弦电动势的瞬时值 e ）随时间变化的规律——正弦曲线。由图1—1可看出，一个正弦交变量可以用一个旋转矢量来表示。

因为代表同频率正弦交变量的旋转矢量，均以相同的角

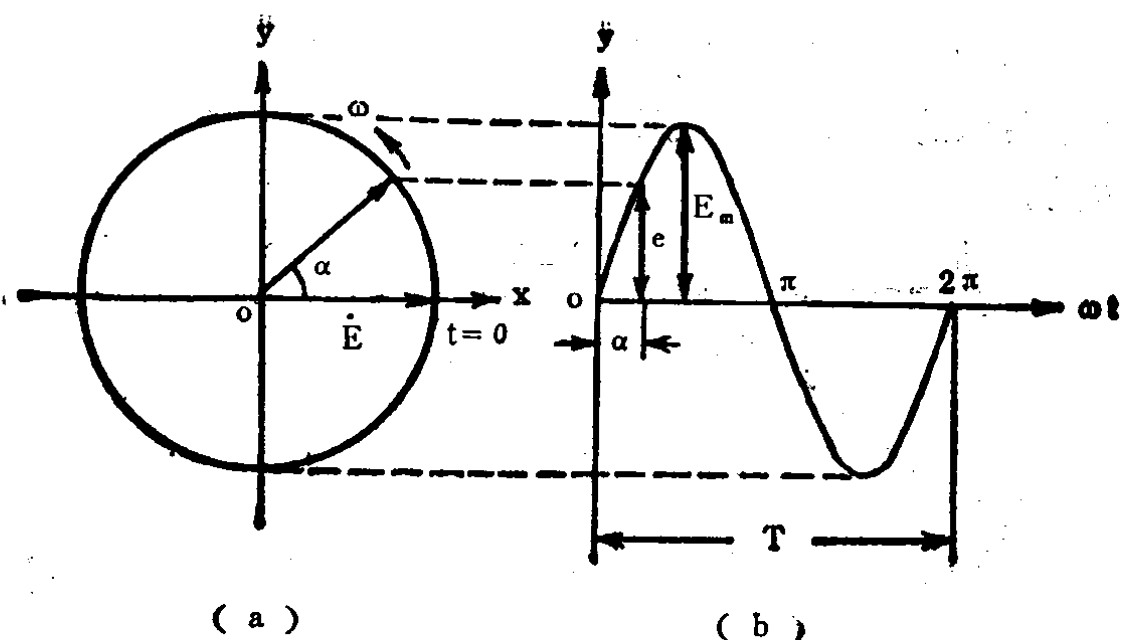


图1—1 正弦交变量用旋转矢量表示

速度旋转，因此在任一瞬时，各个旋转矢量间的相对位置是不变的。这就可以将旋转矢量当作静止矢量来看待。一般可任意选择一个矢量作为参考矢量并画在水平轴（横轴）正方向上，而其他矢量则根据它们与参考矢量之间的相位差画出。各矢量长度则直接代表有效值的大小。

上述方法就是正弦交变量的矢量表示法。正弦电动势、正弦电压和正弦电流的矢量可分别用电动势矢量 $\dot{E}$ 、电压矢量 $\dot{U}$ 和电流矢量 $\dot{I}$ 来表示，它们都是时间矢量，即表示正弦时间函数的矢量。时间矢量不同于空间矢量，后者是代表在空间上有一定方向的物理量（如力）。

这样，两个正弦量的相加或相减就可以很方便地用两个矢量的相加或相减来代替了。在图1—2 (a) 和 (b) 中分别表示出两个电流矢量 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 的相加和相减结果。 $\dot{I}_1$ 代表正弦电流， $i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin (\omega t + \varphi)$ ； $\dot{I}_2$ 代表正弦电流，

$$i_2 = \sqrt{2} I_2 \sin(\omega t)$$

$\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 之间的夹角 φ 就是正弦电流 i_1 和 i_2 的相位差 φ 。通常称 i_1 (的相位) 超前于 i_2 (的相位) φ 角, 或称 i_2 滞后于 i_1 φ 角。

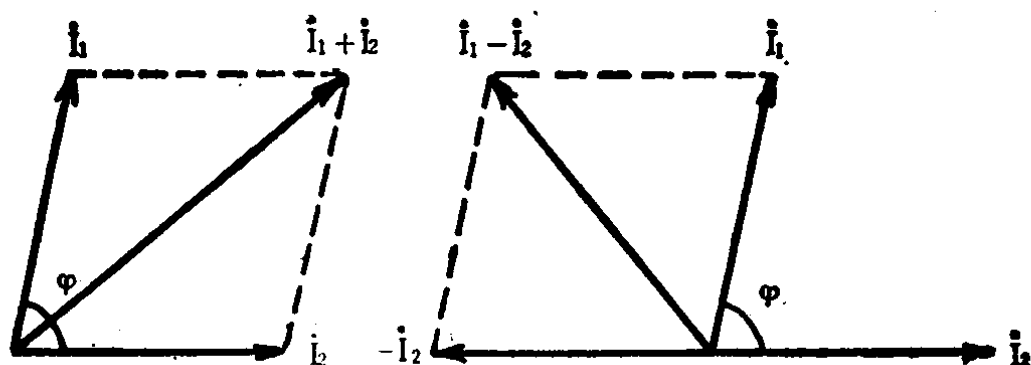


图1—2 矢量的相加和相减

§1—2 无功功率和功率因数

一般工厂企业的主要用电设备是交流异步电动机和变压器。这些用电设备在工作时都需要电网供给电感性的磁化电流来建立交变的工作磁场。所以, 输电线路供给工厂企业的供电电流 $\dot{I}$ 包含了两种成分, 一种是和供电电压 U 同相的有功电流成分 $\dot{I}_P$, 而另一种是和电压之间相位差为 90° 的无功电流成分 $\dot{I}_Q$ 。它们的矢量图如图1—3所示。由图中可看出, 供电电压 $\dot{U}$ 为参考矢量, 供电电流 $\dot{I}$ 则滞后于 $\dot{U}$ 一个角度 φ 。

有功电流 $I_P = I \cos \varphi$, 无功电流 $I_Q = I \sin \varphi$, 而电流 $I = \sqrt{I_P^2 + I_Q^2}$ 。有功电流所作的功等于工厂所消耗的电能, 这部分电能生产过程中转化为其他形式的能量 (如机械能、热能、光能、化学能等)。无功电流则用来建立交变的

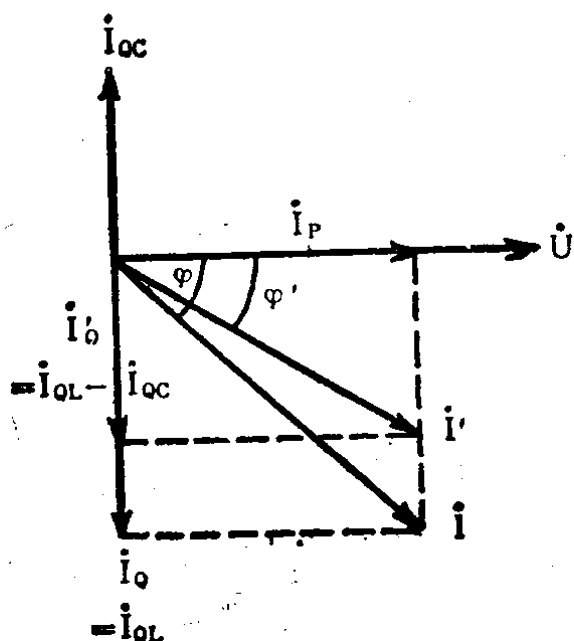


图1—3 电流和电压的矢量图

就是说，在忽略导线电阻的条件下，无功电流并没有做功（即没有使电能转化为机械能等其他形式的能量）。但实际上导线是具有电阻的，所以无功电流通过输配电设备时，在导线上将产生电能消耗和电压降。

交流电路中电压和电流的有效值的乘积称为视在功率，即 $S = UI$ 。它的单位是伏安或千伏安。一般交流电力设备的容量均以视在功率来表示。

视在功率 S 中包括有功功率 P 和无功功率 Q 两种成分。

有功功率（亦称为平均功率）等于电压和有功电流的乘积，即

$$P = UI_P = UI \cos \varphi \quad (1-8)$$

它的单位用瓦或千瓦表示。

无功功率等于电压和无功电流的乘积，即

$$Q = UI = UI \sin \varphi \quad (1-9)$$

它的单位用乏或千乏表示。

视在功率、有功功率和无功功率三者之间关系为

工作磁场，无功电流也就是交流异步电动机和变压器的磁化电流。磁场建立时从电网吸收电能，而在磁场消减时向电网送回所吸收的电能。在交流电变化一周的每个周期内，磁场所吸收的电能和送回的电能相等，所以平均起来并没有消耗电能。也就

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1-10)$$

上述关系适合于交流单相电路。对于交流三相电路则为

$$P = \sqrt{3} UI \cos\varphi \quad (1-11)$$

$$Q = \sqrt{3} UI \sin\varphi \quad (1-12)$$

$$S = \sqrt{3} UI \quad (1-13)$$

因为 $\cos\varphi = \frac{P}{S}$ ，也就是代表了有功功率在视在功率中所占的比值，所以称 $\cos\varphi$ 为功率因数（也称为用电率）。当电流滞后于电压时，功率因数为滞后；而当电流超前于电压时，功率因数为超前。

一个工厂在单位生产时间内所消耗的电能就是有功功率 P （千瓦），它是由工厂生产需要的有功功率和设备的效率所决定的。所以说，当工厂生产需要的有功功率 P 是一定值时，输电线路输送给工厂的电功率即视在功率 S （千伏安）

一般要大于 P ，也就是功率因数 $\cos\varphi = \frac{P}{S} < 1$ 。这是由于存在无功功率 Q 的缘故，并且当 Q 值愈大时，所需的 S 也愈大， $\cos\varphi$ 也就愈低。因此，功率因数也就能表示输送到工厂的电功率被有效利用的程度。例如，一个工厂生产需要的 $P = 200$ 千瓦，当 $\cos\varphi$ 为 0.6 时， $S = \frac{200}{0.6} \approx 333$ 千伏安，而

采取措施把 $\cos\varphi$ 提高到 0.9 后， $S = \frac{200}{0.9} \approx 222$ 千伏安，在同样 P 下， S 比原先可减少 111 千伏安，即可减少 $1/3$ 。

这个道理也可以从前述图 1—3 中分析得到。当工厂原先的无功电流 I_Q ($I_Q = I_{QL}$) 较大时， $\cos\varphi = \frac{I_P}{I}$ 是较低的。如

果在工厂中装设电力电容器（移相电容器），电网供给电容器的电流 I_{QC} 则为容性的无功电流，它超前于电压 90° ，并正好和感性的无功电流 I_{QL} （即异步电动机和变压器的磁化电流）方向相反而互相抵消。若按工厂 I_{QL} 的大小装设适当容量的电力电容器组，使全厂的无功电流 $I'_Q = (I_{QL} - I_{QC})$ 减少到较小数值，功率因数就能提高到0.9以上。在同样 I_P 下，总电流 I 减少到 I' ，而 $S = UI$ 也相应减少到 $S' = UI'$ ，功率因数可由 $\cos\varphi = \frac{I_P}{I}$ 提高到 $\cos\varphi' = \frac{I_P}{I'}$ 。

功率因数提高后能在同样生产消耗 P 时，使工厂需要的供电功率 S （或供电电流 I ）显著下降，这就能使现有的发电、供电设备充分发挥其潜力，并能减少电力线路的电能损耗和提高供电质量。

§1—3 提高功率因数的重要意义

为了供给各个工厂企业的用电需要（即要求供给一定的有功功率和无功功率）。必须装设一定容量的发电设备和输、变电设备（主要是发电机和变压器）。这些设备的额定容量是以视在功率 S_e （千伏安）来表示的，而它们能供给的有功功率 P 则按 $P = S_e \cos\varphi$ 来决定。这些设备每年的发、供电量则等于有功功率乘以年工作小时数，即通常所说的年发电量为多少度（1度等于1千瓦小时）。

上述公式中的 $\cos\varphi$ 为整个地区供电线路（即电网）的功率因数，它主要是由各个工厂企业的功率因数所决定的。因为现有发、供电设备的额定容量 S_e 是一定的，所以它们的供电能力 P （或每年的发、供电量）就取决于功率因数 $\cos\varphi$ 的

高低了。

例如，一台发电机的额定容量 S_e 为1250千伏安，当功率因数为额定功率因数 $\cos\varphi_e$ 为0.8时，则发电机的最大发电能力 $P_e = S_e \cos\varphi_e = 1250 \times 0.8 = 1000$ 千瓦，而当实际功率因数 $\cos\varphi$ 为0.6时，发电机的实际供电能力 $P = 1250 \times 0.6 = 750$ 千瓦。也就是说，还有25%的发电能力不能发挥出来。

输、变电装置中的变压器也是如此，例如一台变压器的额定容量 S_e 为1250千伏安，当功率因数为额定功率因数 $\cos\varphi_e$ 为0.8时，变压器的供电能力 $P_e = S_e \cos\varphi_e = 1250 \times 0.8 = 1000$ 千瓦；当实际功率因数 $\cos\varphi$ 为0.6时，变压器的实际供电能力只有750千瓦；而当采取措施使 $\cos\varphi$ 提高到0.9时，变压器的供电能力可达1125千瓦。

由上述分析可以看出，提高功率因数可使现有的发、供电设备的能力得到充分的发挥，也就是发电机和变压器输出的有功功率 P （或每年发、供电量）能达到最高数值。

由于各个工厂企业的供电电流 $I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos\varphi}$ ，所以在输送同样大小的有功功率 P 时，供电电流 I 将随着功率因数 $\cos\varphi$ 的下降而反比地增大。而供电线路和发、供电设备中的电能损耗将和供电电流的平方成正比地增大，这将造成电能的浪费；供电线路上的电压降也和电流 I 成正比地增大，这将造成工厂企业供电电压降低和电压波动变大，影响用电设备的正常工作。

据资料统计，当电网的功率因数由0.7提高到0.9时，电力系统的各个部分（包括发电站、电力网和用电设备）的电能总损耗将由8%降低到5%，也就是说可以节约总供电量的

3%。

供电线路电压降增大会给用电设备带来不利的影响，因为供电电压降低将使交流异步电动机产生的转矩显著下降（例如电压降低10%将使转矩减少19%）；各种控制电器（如交流接触器）也会因电磁吸力不足而影响正常工作；照明设备发出的光通量也会减少。

总之，提高电网和工厂企业的功率因数，使之达到国家规定的数值，将使现有的发、供电设备能充分发挥其能力，并可减少电能在输送和利用过程中的损耗，为四化建设提供更多的电力。同时，工厂企业的供电质量也将得到提高，有利于用电设备的正常工作；有利于生产效率的提高；还可以减少工厂生产成本中的电费开支。

各级有关部门和工厂企业都应当把提高功率因数当作一项重要的事来对待，根据实际条件采取各项有效的措施，力争在较短时期内把功率因数提高到规定数值。这将有利于改善电力供应不足的紧张局面，保证国民经济能有更大的增长。

§1—4 无功功率的经济当量

根据前述公式

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1-14)$$

可得知，当工厂企业所需的有功功率为一定值时，功率因数的高低就取决于无功功率的大小。因此，只有采取各种措施把无功功率减少到较小数值，才能把功率因数提高到规定数值以上。

无功功率减少后，功率因数将有所提高，电能输送过程

中在电力网上的损耗（有功功率损耗）将会减少。也就是说，能取得一定的节电效果。

如前所述，移相电容器能向电网输送无功功率来补偿用电设备所需的无功功率，使功率因数得以提高。所以这类设备被称为“无功补偿装置”。

在电力网的某一地点采用无功补偿设备来减少电网所输送的无功功率，提高电网功率因数所取得节电效果的大小，可以用“无功功率的经济当量”来衡量。

无功功率的经济当量（用符号K表示）在数值上等于当无功功率减少1千乏时在电力网中有功功率损耗的减少值（千瓦）。所以，它的单位是千瓦/千乏。

下面用图1—4中所示的简化供电线路图来进一步对无功功率的经济当量进行说明。

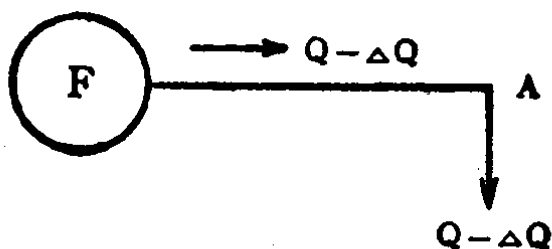


图1—4 无功功率经济当量的计算图

在图1—4中的供电线路终端A点的无功功率为Q，采取措施使无功功率减少了 ΔQ 后，A点的无功功率减为 $Q - \Delta Q$ 。此时，供电线路中的有功功率损耗能减少多少呢？

供电线路（电网）在输送电功率（视在功率）时所损耗的有功功率 ΔP_1 ，可用下式表示

$$\begin{aligned}\Delta P_1 &= 3I^2 R \cdot 10^{-3} = S^2 R \frac{10^{-3}}{U^2} \\ &= \frac{P^2 R \cdot 10^{-3}}{U^2} + \frac{Q^2 R \cdot 10^{-3}}{U^2} = \Delta P_P + \Delta P_Q\end{aligned}\quad (1-15)$$

式中 U 、 I 及 R 为电网电压（千伏）、电流（安）及电网的线路电阻（欧）， ΔP_P 和 ΔP_Q 则为电网输送有功功率而产生的损耗和电网输送无功功率而产生的损耗。

当采取措施使无功功率减少了 ΔQ 后，假设电网输送有功功率所产生的损耗 ΔP_P 是不变的，则电网输送视在功率所产生的损耗 ΔP_2 ，可表达为下式

$$\Delta P_2 = \frac{P^2 R \cdot 10^{-3}}{U^2} + \frac{(Q - \Delta Q)^2 R \cdot 10^{-3}}{U^2} \quad (1-16)$$

所以，无功功率减少 ΔQ 后，电网中有功功率损耗的减少值 ΔP 为

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_1 - \Delta P_2 = \frac{Q^2 R \cdot 10^{-3}}{U^2} - \frac{(Q - \Delta Q)^2 R \cdot 10^{-3}}{U^2} \\ &= \frac{(2Q\Delta Q - \Delta Q^2) R \cdot 10^{-3}}{U^2} \end{aligned} \quad (1-17)$$

可求得经济当量 K 为

$$\begin{aligned} K &= \frac{\Delta P}{\Delta Q} = \frac{(2Q - \Delta Q) R \cdot 10^{-3}}{U^2} \\ &= \frac{Q \left(2 - \frac{\Delta Q}{Q}\right) R \cdot 10^{-3}}{U^2} \end{aligned} \quad (1-18)$$

由上式可以看出，当供电线路电阻愈大时 K 值愈大；无功功率愈大（即功率因数愈低）时 K 值愈大， $\frac{\Delta Q}{Q}$ 较小时 K 值较大，而 $\frac{\Delta Q}{Q}$ 增大时 K 值则相应减小。

根据有关资料计算表明，对工厂企业变电所，无功功率的经济当量 K 值通常在0.02~0.1千瓦/千乏范围内。根据不同的供电方式， k 值将有较大的差异。由发电厂6~10千伏母线直接供电的工厂企业， k 值等于0.02~0.04；经过二级变压器供电的工厂企业， k 值等于0.05~0.07；经过三级变压器

供电的工厂企业， k 值等于 $0.08 \sim 0.1$ 。

采用无功补偿装置后，由于电网输送无功功率所产生的损耗减小而每年所能节约的电能 ΔW 为

$$\Delta W = K Q_K T_p \quad (1-19)$$

式中 Q_K 为补偿装置输出的无功功率（千乏）， T_p 为补偿装置每年的工作时间（小时）。

总之，无功功率的经济当量 k 说明了在电网某一规定点采用无功补偿装置减少电网承担的无功功率，提高功率因数时能取得多大的节电效果。当电网输送的无功功率愈大和电网在输送无功功率时所产生的损耗愈大时，采用无功补偿装置来减少无功功率提高功率因数所取得的节电效果也就愈大。

例题：某地区各工厂变电所的 $6 \sim 10$ 千伏线路由三级变压的电网供电，各工厂采用无功补偿装置所输出的总无功功率为 50000 千乏，年工作时间为 4000 小时，试求每年的总节电量（无功功率经济当量 k 值取 0.08 ）。

$$\begin{aligned} \text{总节电量 } \Delta W &= k Q_K T_p \\ &= 0.08 \times 5 \times 10^4 \times 4 \times 10^3 \\ &= 1600 \text{ 万度。} \end{aligned}$$

§1—5 功率因数的规定值

提高工厂企业的功率因数对国民经济的发展具有重要的意义。但工厂企业的功率因数值等于多少才最经济合理呢？

从减少电网输送无功功率所产生的损耗最少来考虑，功率因数 $\cos\varphi = 1$ 显然最好，因为此时电网输送的无功功率 Q