

楊 芳 春 著

功率因数的提高

5 无功电能的测量

水利电力出版社

3

53

目 录

第一篇 功率因数的提高

第一章 总論	4
第一节 工业企业的自然功率因数和平均功率因数	4
第二节 无功电能的影响和补偿	6
第三节 无功功率的经济当量	9
第四节 补偿装置容量的选择	13
第五节 选择补偿装置合理性的确定	17
第二章 合理地运行感应电动机以提高自然功率因数	18
第一节 概述	18
第二节 未满载感应电动机的调换	19
第三节 降低轻载电动机的电压	31
第四节 限制感应电动机的空载运行	41
第五节 提高感应电动机的检修质量	42
第六节 测定感应电动机负载的简单方法	42
第三章 装置静电电容器组提高功率因数	48
第一节 电容器组的选择	48
第二节 电容器的安装	56
第三节 电容器安装前必需进行的试验	61
第四章 同步电动机功率因数的改进	65
第一节 概述	65
第二节 同步电动机补偿能力的计算	67

第二篇 无功电能的测量

第五章 无功电能测量概述	70
第六章 感应式积算仪表	72
第七章 单相无功电度表	79

第一节 单相无功电度表的原理	79
第二节 具有电容器的单相无功电度表	82
第三节 具有分流器的单相无功电度表	85
第八章 三相无功电度表	87
第一节 三相无功电度表的原理	87
第二节 具有 60° 相角的三相无功电度表	95
第三节 具有 90° 相角的三相无功电度表	99
第四节 具有 120° 相角的三相无功电度表	104
第五节 用单相无功电度表测量三相电路内的无功电能	105
第六节 三相无功电度表的接线	109
第九章 不对称三相电压及电流对三相无功电度表读数 的影响	115
第一节 三相制的对称分量	115
第二节 用电流和电压的对称分量表示三相电路中的功率	123
第三节 不对称三相电压及电流对WTP型无功电度表读数 的影响	124
第四节 不对称的三相电压及电流对具有 60° 相角的无功电度 表读数的影响	130
第十章 用有功电度表测量三相电路内的无功电能	135
第一节 概述	135
第二节 完全对称三相电路内无功电能的测量	135
甲、一表法	135
乙、两表法	139
第三节 简单不对称三相电路内无功电能的测量	148
甲、人工中点法	148
乙、P·T接成Y/ Y_0 -12法	151
丙、P·T中点抽头法	151
丁、自耦变压器法	155
戊、P·T接成Y/ Δ -11法	156
己、C·T接成 Δ 法	158

序 言

提高工业企业用电设备的功率因数是节约电力的一项积极有效的措施。特别是提高用电设备的自然功率因数，对充分发挥电力潜在力量，加速我国社会主义建设有着更重要的意义。因为提高自然功率因数，是通过合理地运行用电设备（例如感应电动机）而实现的，不需要增加任何额外的补偿装置，所以是提高功率因数最经济的方案。

本书第一篇对于自然功率因数的提高、用电容器及同步电动机提高功率因数，均作了详细研究和讨论，并举出一些实例供读者参考。

本书第二篇专门讨论无功电能测量问题，详细论述了测量无功电能的普遍原理及各种类型的无功电度表的构造、原理、误差（由不对称电压及电压而引起的）计算，并对用有功电度表测量无功电能的问题作了系统讨论和研究。

由于作者学识浅陋，错误之处必然很多，望读者多加指教。

著 者

目 录

第一篇 功率因数的提高

第一章 总論	4
第一节 工业企业的自然功率因数和平均功率因数	4
第二节 无功电能的影响和补偿	6
第三节 无功功率的经济当量	9
第四节 补偿装置容量的选择	13
第五节 选择补偿装置合理性的确定	17
第二章 合理地运行感应电动机以提高自然功率因数	18
第一节 概述	18
第二节 未满载感应电动机的调换	19
第三节 降低轻载电动机的电压	31
第四节 限制感应电动机的空载运行	41
第五节 提高感应电动机的检修质量	42
第六节 测定感应电动机负载的简单方法	42
第三章 装置静电电容器组提高功率因数	48
第一节 电容器组的选择	48
第二节 电容器的安装	56
第三节 电容器安装前必需进行的试验	61
第四章 同步电动机功率因数的改进	65
第一节 概述	65
第二节 同步电动机补偿能力的计算	67

第二篇 无功电能的测量

第五章 无功电能测量概述	70
第六章 感应式积算仪表	72
第七章 单相无功电度表	79

第一节 单相无功电度表的原理	79
第二节 具有电容器的单相无功电度表	82
第三节 具有分流器的单相无功电度表	85
第八章 三相无功电度表	87
第一节 三相无功电度表的原理	87
第二节 具有 60° 相角的三相无功电度表	95
第三节 具有 90° 相角的三相无功电度表	99
第四节 具有 120° 相角的三相无功电度表	104
第五节 用单相无功电度表测量三相电路内的无功电能	105
第六节 三相无功电度表的接线	109
第九章 不对称三相电压及电流对三相无功电度表读数的影响	115
第一节 三相制的对称分量	115
第二节 用电流和电压的对称分量表示三相电路中的功率	123
第三节 不对称三相电压及电流对WTP型无功电度表读数的影响	124
第四节 不对称的三相电压及电流对具有 60° 相角的无功电度表读数的影响	130
第十章 用有功电度表测量三相电路内的无功电能	135
第一节 概述	135
第二节 完全对称三相电路内无功电能的测量	135
甲、一表法	135
乙、两表法	139
第三节 简单不对称三相电路内无功电能的测量	148
甲、人工中点法	148
乙、P·T接成Y/ Y_0 -12法	151
丙、P·T中点抽头法	151
丁、自耦变压器法	155
戊、P·T接成Y/ Δ -11法	156
己、C·T接成 Δ 法	158

第一篇 功率因数的提高

第一章 总 論

第一节 工业企业的自然功率 因数和平均功率因数

任何一种用电设备或整个工业企业，其功率因数通常均不能維持不变，而是由于負載的类别、負載变化及电压波动等因素，經常发生变化。其瞬时值可由功率因数表（亦称相位計）或根据电流表、电压表及功率表在同一瞬間內的讀数按下式求得：

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda}}$$

式中 P ——用电设备的有功功率，千瓦；

U_{λ} ——用电设备的綫电压，千伏；

I_{λ} ——用电设备的綫电流，安。

工业企业在一定時間（一班、一昼夜或一个月等）內，依据有功和无功电度表的讀数按下列关系而求得的功率因数値，称为总平均功率因数。

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{W_p}{W_a}\right)^2}} \quad (1-1)$$

式中 W_a ——有功电能値，即有功电度表的讀数，千瓦
时；

W_p ——无功电能值，即无功电度表的读数，千乏时。

而工业企业的总平均功率因数，系包括用来改善功率因数的补偿装置参与工作时的综合的平均功率因数。

根据现行的电价制度，当未采用人工补偿时，企业的总平均功率因数称为自然总平均功率因数。即

$$\cos \varphi_s = \sqrt{1 + \left(\frac{W_p + W_k}{W_a} \right)^2} \quad (1-2)$$

式中 W_k ——补偿装置（如静电电容器、同步补偿器等）供给电网中的无功电能的总量，其值为补偿装置处安装的无功电度表的读数，千乏时。

为了简化计算起见，往往把式（1-1）或式（1-2）用图解法来计算总平均功率因数或自然总平均功率因数。图 1-1 所示即为图解功率因数的诺模图，左边是有功电能和无功电能的比值

值 $K = \frac{W_a}{W_p}$ ；右边即是总平均功率因数之值。

例题：某厂在某月，分别在有功电度表及无功电度表上抄得用电量为 $W_a = 3000$ 千瓦时， $W_p = 2000$ 千乏时， $W_k = 2000$ 千乏时，试确定这个月的总平均功率因数及自然总平均功率因数。

求总平均功率因数时，应首先求得比值

$$K = \frac{W_a}{W_p} = \frac{3000}{2000} = 1.5.$$

再由图 1-1 中左边 $K = 1.5$ 所在点，对应的右边读数即为总平均功率因数等于 0.83 或 83%。

求自然总平均功率因数时，应先求得比值



图 1-1 $\cos \varphi$ 的诺模图

$$K = \frac{\bar{W}_a}{W_p + W_k} = \frac{3000}{4000} = 0.75,$$

再由图1-1中查得，自然总平均功率因数等于0.6或60%。

第二节 无功电能的影响和补偿

大家都知道，为了在感应电动机和变压器中建立磁场，必须有落后于电压90°的磁化电流（即无功电流）。因此，发电机除了发出和分配有功电能以外，同时还要发出无功电能。这种电能并不直接作有用的功，它在电动机和变压器的绕组以及输电线与发电机之间来回振荡着。

考虑到电动机和变压器需要一定的无功功率，所以现代的发电机是按额定运行时的功率因数为0.85至0.9制造的。为了最经济地利用发电机起见，应尽可能使用户具有不低于上述数值功率因数。但事实上，由于工作人员的注意不够，或由于电动机和变压器运行的不合理（如负载不足或空载运行等），使用户的功率因数显著地降低，在个别的情形下降到0.6甚至更低的数值。

由于用户的功率因数低，发电机的利用率也显著地降低，这样给国民经济带来极大的损失。

低功率因数的后果如下：

1. 电气设备不能充分利用 用电设备所需的无功电流，是由发电机供给的。因此由发电机到用户之间的各部分电路，除了荷载着有功电流以外，同时还荷载着用以建立磁场的无功电流。有功电流和无功电流的向量和就是循环于电路中的线路电流，发电机和变压器绕组中及输电线路中的导线截面即根据该电流来选取的。

输送同样的有功功率时，如功率因数愈低，则线路电

流也愈大，所以輸電綫、變壓器和發電機的尺寸，以及與此有關的投資費用和材料消耗量便愈大，這就增加了成本。

當輸電綫、變壓器和發電機的容量及尺寸已定時，如功率因數值過分降低，而引起綫路或導綫電流超過額定電流值。為了不超過容許溫升起見，必須降低綫路或導綫中的電流值，這就降低了設備的供電能力。因此，在低功率因數值運行下的電氣設備是不能充分發揮其利用率的。

2. 增加損耗，降低效率 由於用電設備的銅損與電流平方成比例，因而設備在供給或傳送同樣的有功功率情況下，銅損的絕對值在低功率因數運行時將大大地增加。

表1-1所示，是在同樣的有功功率下在不同功率因數時相應的銅損百分比。

設 $\cos\varphi = 1.0$ 時的銅損為100%：

表 1-1 各種功率因數下的銅損百分比

$\cos\varphi$	銅 損 百 分 比	$\cos\varphi$	銅 損 百 分 比
1.0	100	0.6	282
0.9	124	0.5	405
0.8	158	0.4	650
0.7	206	—	—

由表1-1可見，當 $\cos\varphi = 0.5$ 時，銅損增加為 $\cos\varphi = 1.0$ 時的4倍；而當 $\cos\varphi = 0.4$ 時，則增加到6.5倍。

3. 引起較高的綫路電壓降 功率因數值低導致綫路電流增加，故在綫路的所有部分中將引起附加的電壓損失。因之，低功率因數時欲保持用戶電壓在一定的水準上是比較困難的。

4. 限制了电网的输电能力 电网各个组成部分（包括输电綫及开关設備等）是在容許溫升及容許电压損失下来决定输电能力的,当功率因数低时,引起綫路电流加大,为了滿足上述的容許条件,必須降低输电能力。

从上述几点来看,用戶的功率因数过低,对整个国民經济带来了很大的損失及不利。

为了督促用戶注意改进自己用电設備的功率因数起見,电业部門确定有功电能及无功电能均須收取电费。并且采用了按功率因数高低来調整电价的制度,如規定总平均功率因数值超过某一数值时可得奖金,若低于某一数值时将被罰款等等(見表1-2及表1-3)。

所謂自然調整功率因数,就是在工业企业中降低用电設備的无功电能需要量,以改善各个用电設備的自然功率因数。例如改进操作規程,調整設備(用小容量电动机代替容

表 1-2

自然調整增減电价表

用戶实际 每月平均 力 率	.75	.76	.77	.78	.79	.80	.81	.82	.83	.84	.85	.86	.87	.88	.89	.90
用戶电力 用电全部 电费減低 (%)	0	.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
用戶实际 每月平均 力 率	.75	.74	.73	.72	.71	.70	.69	.68	.67	.66	.65	.64	.63	.62	.61	.60
用戶电力 用电全部 电费增加 (%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
力率自.91 以上电力用电,全部电费同.90,自力率.59 起每減低0.01时,电力用电全部电费增加2%。																

表 1-3

人工調整增減電價表

用戶實際每月平均力率	0.76—	.80	.81—	.83	.84—	.86	.87—	.89	.90—	.92	.93—	1.00
用戶電力用電全部電費減低(%)	0		1		2		3		4		5	

用戶實際每月平均力率低於 0.75 時，其用戶全部電費增加百分數與自然調整法同。

注：上表見“電世界”雜誌 1955 年 10 期 461 頁

量大而負載輕的電動機)，限制電動機空載運行等，均可降低用電設備的無功電能的需要量。而人工調整功率因數，就是用戶裝用經濟的無功電能發生設備（如靜電電容器）來供給自己所需的無功電能，從而減少發電機所供給的無功電能；使電網功率因數得到改善。但採用人工補償方法來改善功率因數，必須安裝補償裝置，增加投資。因此，尽可能採用提高自然功率因數的方法才是最合理的方案。從電價表上亦可以看出，提高自然功率因數時電費減低的百分率較高，也正是由於上述的理由。

第三節 無功功率的經濟當量

功率因數的提高，在經濟上對各方面的影響是很大的。由於牽涉面廣，如果要精確地計算它在經濟上的價值，是十分繁雜的，所以在實用上，通常採用較簡單的方法，即用無功功率的經濟當量來進行技術經濟核算。所謂無功功率的經濟當量，就是由於減少無功功率的需要量而降低的有功功率損耗值與無功功率需要量的降低值之比，也就是說，把無功功率需要量每降低一千乏時，所節省的有功功率之千瓦數。

當輸送視在功率 S 經過三相交流線路中的任一組成部

分，必然有由它們的电阻 r 而产生的功率損耗，其值可計算如下：

$$\begin{aligned}\Delta P_1 &= 3I_A^2 r 10^{-3} = \left(\frac{S}{U_A}\right)^2 r 10^{-3} \\ &= \frac{P^2 r 10^{-3}}{U_A^2} + \frac{Q^2 r 10^{-3}}{U_A^2} = \Delta P_a + \Delta P_p. \quad (1-3)\end{aligned}$$

式中 S 、 P 及 Q ——視在功率(千伏安)、有功功率(千瓦)及无功功率(千乏)；

I_A 、 U_A 及 r ——綫路的总电流(安)、綫电压(千伏)及每相电阻(欧)；

ΔP_a 及 ΔP_p ——有功功率及无功功率損耗(千瓦)。

在提高功率因数时，由于 Q 值的减少， ΔP_p 值势必随之降低。若不計因减少无功功率而减少的有功功率，則 ΔP_a 的值几乎无甚变化。当采用提高功率因数的措施使自然功率因数提高，或用人工补偿方法使无功功率的需要量中减少 Q_K 时，則功率損耗值为：

$$\Delta P_2 = \frac{P^2 r 10^{-3}}{U_A^2} + \frac{(Q - Q_K)^2 r 10^{-3}}{U_A^2}.$$

故由于减少了无功功率的需要量而降低的淨功率損耗值为：

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_1 - \Delta P_2 = \frac{P^2 r 10^{-3}}{U_A^2} + \frac{Q^2 r 10^{-3}}{U_A^2} - \frac{P^2 r 10^{-3}}{U_A^2} \\ &\quad - \frac{(Q - Q_K)^2 r 10^{-3}}{U_A^2} = \frac{Q_K(2Q - Q_K) r 10^{-3}}{U_A^2}. \quad (1-4)\end{aligned}$$

按无功功率的經濟当量定义可知：

$$\begin{aligned}K_y &= \frac{\Delta P}{Q_K} = \frac{2Q r 10^{-3}}{U_A^2} - \frac{Q_K r 10^{-3}}{U_A^2} = \frac{Q^2 r 10^{-3}}{Q U_A^2} \left(2 - \frac{Q_K}{Q}\right) \\ &= \frac{\Delta P_p}{Q} \left(2 - \frac{Q_K}{Q}\right) = K_y \left(2 - \frac{Q_K}{Q}\right), \quad (\text{千瓦/千乏}).\end{aligned}$$

(1-5)

式中 $K_y = \frac{\Delta P_p}{Q}$ ——无功功率通过线路组成部分的电阻

r 时的单位损耗值;

$\frac{Q_K}{Q}$ ——用电设备中无功功率需要量的相对

降低值, 可称为补偿率。

经济当量是依电网区域变电所 6~10 千伏母线上的功率因数及供电系统中所研究之点与电源远近而定。图 1-2 及图 1-3 和表 1-4 (摘自苏联资料) 中列出了供电系统中各个不同部分经济当量的概略值, 在变压器装置距供给无功功率的电源愈远时, 则经济当量愈大, 这是由于无功功率需经过长距离电网输送, 使电网内产生甚大的有功功率损耗。如果变压器直接由电源母线供电时, 则经济当量就要相对地减小很多。

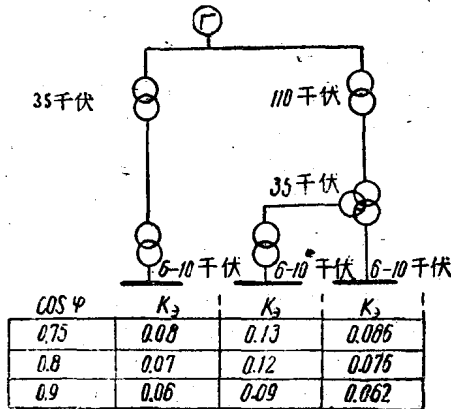


图1-2 区域变电所6~10千伏母线上的
无功功率经济当量 K_2 值

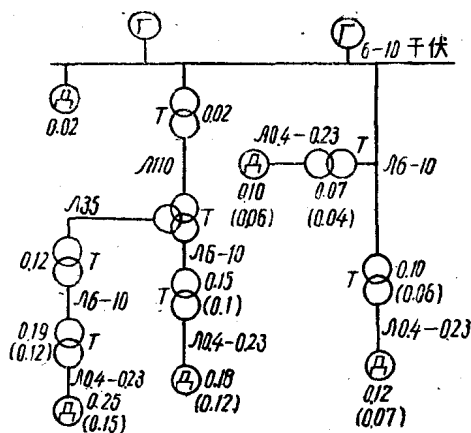


图1-3 标准供电系统各个不同部分的无功功率
经济当量 K 。(图上括号中的数字为负载最小时的 K 值)
 $\mathbb{A}110, \mathbb{A}35-110$ 及35千伏线路; $\mathbb{A}6-10-6\sim10$ 千伏线路; $\mathbb{A}0.4$
 $\sim \mathbb{A}0.23-0.4\sim0.23$ 千伏线路; $\mathbb{A}$ —电动机; T —电力变压器。

表 1-4

无功功率的经济当量 K 。

系统内变压器装置地点的特征	K , 千瓦/千乏	
	在电力网最大 负载时	在电力网最小 负载时
直接由发电厂母线供电(发电机电压)的变 压器	0.02	0.02
由发电厂供电(发电机电压)的线路变压器 (例如由工厂或市区发电厂供电的工业企 业用变压器)	0.07	0.04
由区域线路供电的 35~110 千伏的降压变 压器	0.10	0.06
由区域线路供电的降压变压器其无功功率 由同步补偿器供应	0.05	0.03

为了提高功率因数而采取的措施在技术经济上的合理性，可按下式判断：

$$\Delta P = K_s(Q_1 - Q_2) + (P_1 - P_2) > 0,$$

或

$$\Delta P = K_s(\pm Q_K) + (\pm \Delta P_a) > 0. \quad (1-6)$$

式中 ΔP ——由于采取措施所节约的全部有功功率，千瓦；

ΔP_a ——由于采取措施，用电设备所节约的有功功率 ($\Delta P_a > 0$)；或者浪费的有功功率 ($\Delta P_a < 0$)，千瓦；

Q_K ——由于采取措施所降低的无功功率 ($Q_K > 0$)；或者所增加的无功功率 ($Q_K < 0$)，千乏；

P_1 及 P_2 ——采取措施前后用电设备的有功功率，千瓦；

Q_1 及 Q_2 ——采取措施前后用电设备的无功功率，千乏；

K_s ——供电系统中采取措施点的无功功率的经济当量，千瓦/千乏。

如果采取措施以后，功率因数得到提高，而有功功率得到节约 ($\Delta P > 0$)，则采取这种措施在原则上是合理的。

如已知用电设备在提高功率因数之后的年持续工作时间为 T 小时，可根据下式概略地算出每年节约的电能值为：

$$\Delta W_a = \Delta P T = [K_s(\pm Q_K) + (\pm \Delta P_a)] T. \quad (1-7)$$

每年节约的全部金额为：

$$\Delta C = \Delta W_a \beta. \quad (1-8)$$

式中 β ——电能的价格，元/千瓦时。

第四节 补偿装置容量的选择

在选择补偿装置的容量及型式时，须以技术经济为根据，

否則补偿装置不但不能作为提高电网效率的工具，反而会降低其效率。对于每一补偿装置均要求它能在最坏的情况下仍能保持該电网的效率于原有水平上。

假如在采用补偿装置后，无功功率的需要量减少 Q_k ，并設 Q_k 与补偿装置本身的容量 S 相等或 $Q_k = S$ ，則由减少了无功功率的需要量而降低的淨功率損耗值 ΔP (式1-4) 中减去补偿装置本身的有功功率損耗 ΔP_k ，即求得功率損耗的降低值：

$$\begin{aligned}\Delta P &= \frac{Q_k(2Q - Q_k)r10^{-3}}{U_A^2} - \Delta P_k \\ &= \frac{Q_k(2Q - Q_k)r10^{-3}}{U_A^2} - K_k Q_k \\ &= \frac{S(2Q - S)r10^{-3}}{U_A^2} - K_k S \\ &= \frac{2QSr10^{-3}}{U_A^2} - \frac{S^2r10^{-3}}{U_A^2} - K_k S. \quad (1-9)\end{aligned}$$

在上式中， $K_k = \frac{\Delta P_k}{Q_k}$ 称为补偿装置本身的单位損耗值，即每发出1千乏的无功功率在补偿装置本身所損耗的有功功率值。用靜电电容器时， $K_k = 0.3 \sim 0.5\%$ ；以同步电动机代替感应电动机时， $K_k = 1\%$ 。

将上式对 S 微分而使其等于零，可求得电网中功率損耗最小时补偿装置所需的最經濟容量。即

$$\frac{d\Delta P}{dS} = \frac{2Qr10^{-3}}{U_A^2} - \frac{2Sr10^{-3}}{U_A^2} - K_k = 0,$$

或

$$2Qr10^{-3} - 2Sr10^{-3} - K_k U_A^2 = 0.$$

因此，以 S_n 表示补偿装置的最經濟容量：