

电网无功补偿 实用技术

靳龙章 丁毓山 主编

中国水利水电出版社

电网无功补偿实用技术

靳龙章 丁毓山 主编

中国水利水电出版社

DW107/154

图书在版编目 (CIP) 数据

电网无功补偿实用技术/靳龙章, 丁毓山主编. —北京: 中国水利水电出版社, 1997

ISBN 7-80124-366-8

I. 电… I. ①靳… ②丁… II. 电力系统-无功补偿 N. TM714.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 03087 号

书 名	电网无功补偿实用技术
作 者	靳龙章 丁毓山 主编
出版、发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京金剑照排厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 32 开本 8.5 印张 185 千字 1 插页
版 次	1997 年 8 月第一版 1997 年 8 月北京第一次印刷
印 数	0001—3570 册
定 价	14.00 元

编写人员名单

主 编 靳龙章 丁毓山

副主编 何敬文 陈传宝

裴陆国 李 伟

参 编 王天策 侯庭旻

纪建伟 张秀然

前 言

《电网无功补偿实用技术》是一本实用性很强的书籍，全书从考虑网络无功平衡的角度，深入地讨论了网络无功补偿的必要性；定量分析了无功补偿因降低网损所带来的经济效益；从工程实用角度提出了各种确定补偿容量的一般方法。考虑无功补偿技术的发展，书中对静止补偿技术也给予了充分的注意。特别应该指出的是：书中曾用较大的篇幅简述了无功补偿的优化理论，诸如动态优化法、牛顿法以及等面积法则等。为便于应用，书中给出了相当份量的计算实例，对计算工作量较大的部分，皆给出了程序设计的流程或者给出了算法的程序。

编者要申明的是：

本书第四章第一节节选了水利电力出版社《农电手册》编写组编写的农电手册（二版）有关内容，第五节节选了齐明同志主编的电力工程安全技术手册有关内容，编者在此表示谢意。

编 者

1996 于沈阳

目 录

前 言

第一章 无功补偿一般问题分析	1
第一节 无功补偿和提高功率因数的意义	1
第二节 功率因数调整电费	3
第三节 用户的最佳功率因数值的确定和改善 $\cos\varphi$ 的效益分析	10
第四节 无功补偿对电压损失率的影响和无功补偿经济当量	15
第二章 确定无功补偿容量的一般方法	21
第一节 确定补偿容量的几种方法	21
第二节 低压网无功补偿的实用方法	30
第三节 电力网无功补偿规划	36
第四节 变压器在无功补偿中有关参数的计算	43
第三章 电容器的控制与保护	50
第一节 电容器自动投切的方式	50
第二节 无功负荷阶梯图的简化法	56
第三节 微机控制补偿装置	62
第四节 电容器的过流、过压保护	68
第五节 电容器的横差保护	71
第六节 电容器保护配置和整定计算	72
第七节 电容器的集成电路保护	75
第四章 电容器维护和使用	81

第一节	电容器结构	81
第二节	电容器的故障	90
第三节	电力电容器的安全运行	98
第四节	移相电容器的运行和维护	106
第五节	电容器使用中应注意的问题	110
第五章	静止补偿装置和功率因数自动补偿	121
第一节	静止补偿器的功能及种类	121
第二节	两种基本类型可控硅控制静止补偿器的运行 特性	125
第三节	静止补偿器的应用	137
第四节	功率因数自动控制器的发 展概 况	140
第五节	新型微电脑功率因数自动控制器简介	146
第六章	补偿容量和位置的经典优化法	154
第一节	按网损和年运行费最小确定补偿容量	154
第二节	按年支出费用最小和等网损微增率确定补偿容量	159
第三节	无功容量的合理分配	163
第四节	考虑负荷分布时补偿容量和补偿位置的优化	168
第五节	用相对分析法确定分均匀分布无功负荷的补偿 容量	181
第六节	确定最佳补偿的 β 分布法	186
第七章	各种优化法在网络补偿中的应用	198
第一节	无功补偿的动态优化	198
第二节	非线性规划法在网络补偿中的应用	207
第三节	牛顿法在网络补偿中的应用	217
第八章	无功补偿的等面积法则的程序设计	226
第一节	线路长度和无功电流的折算	226
第二节	确定最佳容量和最佳位置的定理	231

第三节	等面积法则.....	241
第四节	补偿装置的经济分析.....	246
第五节	等面积法则的程序设计.....	252

第一章 无功补偿一般问题分析

近年来，由于电网容量的增加，对电网无功要求也与日增加。无功电源如同有功电源一样，是保证电力系统电能质量、电压质量、降低网络损耗以及安全运行所不可缺少的部分。在电力系统中，无功要保持平衡，否则，将会使系统电压下降，严重时，会导致设备损坏，系统解列。此外，网络的功率因数和电压降低，使电气设备得不到充分利用，促使网络传输能力下降，损耗增加。因此，解决好网络补偿问题，对网络降损节能有着极为重要的意义。

第一节 无功补偿和提高功率因数的意义

一、电力网络的功率因数

电力网除了要负担用电负荷的有功功率 P ，还要负担负荷的无功功率 Q 。有功功率 P 、无功功率 Q 和视在功率 S 之间存在下述关系，即

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

而

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (1-2)$$

被定义为电力网的功率因数，其物理意义是线路的视在功率 S 供给有功功率的消耗所占百分数。在电力网的运行中，我们所希望的是功率因数越大越好，如能做到这一点，则电路中

的视在功率将大部分用来供给有功功率，以减少无功功率的消耗。

二、提高功率因数的意义

(一) 改善设备的利用率

因为功率因数还可以表示成下述形式

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

其中 U ——线电压(kV)；

I ——线电流(A)。

可见，在一定的电压和电流下，提高 $\cos\varphi$ ，其输出的有功功率越大。因此，改善功率因数是充分发挥设备潜力，提高设备的利用率的有效方法。

(二) 提高功率因数可减少电压损失

因为电力网的电压损失可借下式求出

$$\Delta U = \frac{PR + Qx}{U} \quad (1-4)$$

可以看出，影响 ΔU 的因素有四个：线路的有功功率 P 、无功功率 Q 、电阻 R 和电抗 x 。如果采用容抗为 x_c 的电容来补偿，则电压损失为

$$\Delta U = \frac{PR + Q(x - x_c)}{U} \quad (1-5)$$

故采用补偿电容提高功率因数后，电压损失 ΔU 减小，改善了电压质量。

(三) 减少线路损失

当线路通过电流 I 时，其有功损耗

$$\Delta P = 3I^2 R \times 10^{-3} (\text{kW})$$

或
$$\Delta P = 3 \left(\frac{P}{U \cos\varphi} \right)^2 R \times 10^{-3} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \times 10^{-3}$$

$$= 3 \frac{P^2 R}{U^2} \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} \right) \times 10^{-3} (\text{kW})$$

可见，线路有功损失 ΔP 与 $\cos^2 \varphi$ 成反比， $\cos \varphi$ 越高， ΔP 越小。

(四) 提高电力网的传输能力

视在功率与有功功率成下述关系

$$P = S \cos \varphi$$

可见，在传送一定有功功率 P 的条件下， $\cos \varphi$ 越高，所需视在功率越小。

第二节 功率因数调整电费

一、按功率因数调整电费

我国的两部电价结构，实际上是包括基本电费、电量电费和按功率因数调整电费三部分。发、供电部门，除了供给用户的有功负荷之外，还要供给用户以无功负荷。用户的所有测量和用电设备，皆有电感和电容存在，所谓无功负荷，则是为了维持电源与用电设备的电感、电容之间磁场和电场振荡所需要的能量。因此，只要电力系统已经形成，该能量则是不可避免的。

(一) 实行功率因数调整电费的目的

鉴于电力生产的特点，用户功率因数的高低，对于电力系统发、供、用电设备的充分利用，有着显著的影响。提高用户的功率因数，不但可以充分的发挥发、供电设备的生产能力、减少线路损失、改善电压质量，而且可以提高用户用电设备的工作效率和节约电能。为合理地使用国家的能量资源，充分发挥发、供电设备的生产能力，特制定按功率因数

调整电费办法。

(二) 按功率因数调整电费的办法

我国制定的《力率调整电费办法》适用于实行两部电价制大工业用户的生产用电。按功率因数调整电费的收取方法是：

(1) 按照规定的电价计算出当月的基本电费和电量电费。

(2) 再按照功率因数调整电费表所订的百分数增减计算，如表 1-1 和表 1-2 所示。

表 1-1 减免功率因数电费表

月平均功率因数	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.0
全部电费的减少(%)	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.2	2.5	2.7	3.0							

表 1-2 增收功率因数电费表

平均功率因数	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72
增收(%)	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
平均功率因数	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.60	
增收(%)	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10	11	12	13	14	15	
备注	自 0.59 以下，每降低 0.01，增收全部电费 2%												

(3) 计算用户的功率因数采用加数平均值，即以用户在一个月内所消耗的有功电量 W 和无功电量 Q 进行计算，即

$$\cos\varphi = \frac{W}{\sqrt{W^2 + Q^2}} \quad (1-6)$$

如果用户的平均功率因数在功率因数调整电费表所列数字之间，以四舍五入计算。如 0.855 为 0.86，0.754 为 0.75。

(三) 功率因数调整电费计算公式

功率因数调整电费表形式复杂，数字繁多，难于记忆，工作不便。尤其是使用计算机管理时，功率因数调整电费多由数学模型计算得出。为此，特导出功率因数调整电费的计算公式，以便于应用。

现以功率因数标准为 0.85 为例，来说明增收功率因数调整电费百分值计算公式的建立方法。

当实际功率因数值在 0.65~0.85 之间，从表 1-2 不难看出：功率因数每降低 0.01，则功率因数调整电费的增收率增加 0.5%，用公式表示则为

$$(0.85 - \cos\varphi) \times 50\% = 50(0.85 - \cos\varphi)\% \quad (1-7)$$

例如， $\cos\varphi = 0.79$ ，则功率因数调整电费的增收率为

$$50(0.85 - 0.79)\% = 3\%$$

其结果与表 1-2 是一致的。

而当实际功率因数在 0.6~0.65 之间时，功率因数每降低 0.01，则调整电费的增收率增加 1%，于是有

$$\begin{aligned} (0.65 - \cos\varphi) + 0.1 &= 0.75 - \cos\varphi \\ &= 50(1.5 - 2\cos\varphi)\% \end{aligned} \quad (1-8)$$

若 $\cos\varphi = 0.63$ ，则

$$50(1.5 - 2 \times 0.63)\% = 50 \times 0.24\% = 12\%$$

其余功率因数调整电费的计算公式可参见表 1-3。

表 1-3

功率因数调整电费计算公式表

标 准	实际 $\cos\varphi$	电费调整计算公式(%)
0.8	0.55	$+50 \times (2.5 - 4\cos\varphi)$
	0.55~0.60	$+50 \times (1.4 - 2\cos\varphi)$
	0.60~0.80	$+50 \times (0.8 - \cos\varphi)$
	0.80~0.90	$-10 \times (0.8 - \cos\varphi)$
	0.91	-1.15
	0.92~1.00	-1.30
0.85	0~0.60	$+50 \times (2.7 - 4\cos\varphi)$
	0.60~0.65	$+50 \times (1.5 - 2\cos\varphi)$
	0.65~0.85	$+50 \times (0.85 - \cos\varphi)$
	0.85~0.90	$-10 \times (0.85 - \cos\varphi)$
	0.90~0.94	$-10 \times (1.3 - 1.5\cos\varphi)$
	0.94~1.00	-1.10
0.9	0~0.65	$+50 \times (2.9 - 4\cos\varphi)$
	0.65~0.70	$+50 \times (1.6 - 2\cos\varphi)$
	0.70~0.90	$+50 \times (0.9 - \cos\varphi)$
	0.90~0.95	$-15 \times (0.9 - \cos\varphi)$
	0.95~1.00	-0.75

二、现行功率因数调整电费办法所存在的问题

(一) 免费供应的无功电力比例过大

对一般工业用户而言,要求功率因数为 0.85,即供应每兆瓦时有功电量,则免费供应无功电量为 619kvar。这种搭配比例已不适应大电力系统的发展,因为大电网的超高压输变电设备,输送无功的损耗很高,并且随负荷波动其变化很大。因此需要考虑自动调整的无功补偿,并要求无功电力就地供

应。

(二) 对超用或少用无功电量的用户计费方法不合理

若功率因数的标准为 0.85, 欲使其从 0.85 提高到 0.86, 则当用户的有功电量为 $100\text{MW} \cdot \text{h}$, 需补偿无功电量为

$$\begin{aligned} Q &= W(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) \\ &= 10^6 \times (0.6197 - 0.593) \\ &= 2670(\text{kvar} \cdot \text{h}) \end{aligned}$$

可是, 按表 1-1 规定其减收电费为 0.5%。而若使 $\cos\varphi$ 从 0.95 提高到 0.97, 则需补偿无功电量为

$$\begin{aligned} Q &= W(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) \\ &= 10^6 \times (0.3287 - 0.2506) \\ &= 7810(\text{kvar} \cdot \text{h}) \end{aligned}$$

按表 1-1 规定只得到减收电费为 0.2%。在客观上形成不支持用户把功率因数提高到 0.95 以上, 其又是与电力系统的需要相违背的。

(三) 不适当的鼓励造成电费收入减少

对大工业用户, 要求其功率因数为 0.90, 当用户装设少量的无功补偿设备时, 使其 $\cos\varphi$ 达到 0.905, 按着四舍五入的原则, 则可使 $\cos\varphi$ 折算为 0.91, 这时用户则可得到 2% 减收电费的利益。对于供电部门来说, 这是少收电费的漏洞。

(四) 无功倒送造成电费收入减少

按着功率因数调整电费的办法规定, 安装在用户的无功的电能表应加装防倒装置, 对用户倒送的无功电量不作扣除或不作统计。有些供电单位对这一规定执行不严, 给电费收入造成损失。从道理上来说, 仅装防倒装置是不够的, 还应考虑加装倒送无功电量的计量, 对倒送无功电量进行收费。这是因为, 用户倒送无功的时间, 绝大多数是电网无功过剩的

时间，这将给电网带来很大的功率负担和额外线损，并对电网造成过电压危害，迫使安装电抗器，以便就近吸收，由此造成电网的投资增加。可见，电业部门对用户倒送无功收取一定的费用是合理的。

(五) 关于民用电器设备的无功补偿问题

目前，我国城市和农村生活用电不断增长，但民用电器的功率因数很低，大多数民用电器不带补偿装置，特别是日光灯。供电部门和政府有关部门应对民用电器生产实行严格的监督，要求 $\cos\varphi$ 应不低于 0.95，否则将不颁发产品合格证。对未装补偿的民用电器应另行拟定收费办法。

三、用户电费调整办法分析

现行的无功电价是按有功电价的一定比例 B 来收取的，即

$$B = \frac{G_Q}{G_P} \quad (1-9)$$

式中 G_Q ——无功电量单位电价；

G_P ——有功电量单位电价。

若无功电量为 H_Q ，则应收电费为 $F_Q = H_Q B G_P$ 。根据“功率因数调整电费办法”，对容量为 320kVA 及以上的用户，应免费搭配一定比例的无功电量。例如，当功率因数标准为 0.85 时，则每兆瓦时有功电量免费搭配 619kvar·h 无功电量。对超用的无功电量，按 B 值折算为有功电量以增收电费，反之，对少用无功电量则减收电费。今设增、减收电费的百分数为 f ，则

$$f = \frac{\Delta H_Q G_Q}{H_P G_P} = \frac{H_Q - H_i}{H_P} B = (K - K_0) B \quad (1-10)$$

式中 ΔH_Q ——超(少)用的无功电量数(kvar·h)。

G_Q —— 无功电量电价 [元/(kvar · h)];

G_P —— 有功电量电价 [元/(kW · h)];

H_P —— 当月抄见有功电量数(kW · h);

H_Q —— 当月抄见无功电量数(kvar · h);

H_r —— 按规定搭配的无功电量数(kvar · h)。

$$K = H_Q / H_P = \tan \varphi; \quad K_0 = H_r / H_P = \tan \varphi_0$$

由于 K_0 为标准功率因数所确定的数值,故按规定, K_0 值如下:

当 $\cos \varphi = 0.85$, $K_0 = 0.6197$;

当 $\cos \varphi = 0.9$, $K_0 = 0.4843$;

当 $\cos \varphi = 0.95$, $K_0 = 0.3287$;

当 $\cos \varphi = 0.8$, $K_0 = 0.7500$ 。

(1) 对大工业用户, 功率因数要求为 0.95, B 值可采用 $(8+12K)$, 故增收电费百分数

$$f = (8+12K)(K-0.3287)\% \quad (1-11)$$

对用户的实收电费为

$$F_0 = E_b \left(1 + \frac{f}{100} \right) \quad (1-12)$$

式中 E_b —— 用户的电量电费和基本电费之和。

(2) 对普通工业用户, 功率因数要求为 0.9, 则增收电费百分数为 $f = (8+12K)(K-0.4843)\%$; 当功率因数要求为 0.85, 则

$$f = (8+12K)(K-0.6197)\% \quad (1-13)$$

$$F_P = E_b \left(1 + \frac{f}{100} \right)$$

(3) 对农电用户, 功率因数要求为 0.8, 而 $B = (6+10K)$, 故