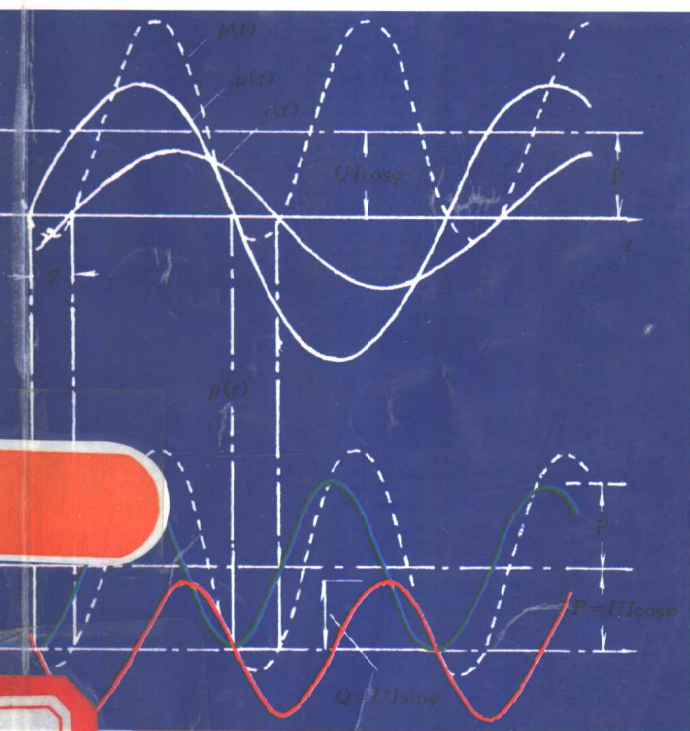


许业清 编著

实用无功功率 补偿技术



中国科学技术大学出版社

173246

Tm1714.3
3833

实用无功功率补偿技术

许业清 编著

中国科学技术大学出版社

1998·合肥

实用无功功率补偿技术

许业清 编著

*

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号, 邮编: 230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

*

开本: 787×1092/32 印张: 5.75 字数: 128 千

1998 年 9 月第一版 1998 年 9 月第一次印刷

印数: 1—5000 册

ISBN 7-312-01013-X/TM · 11 定价: 10.00 元

内 容 提 要

本书是我国目前较全面系统论述无功功率补偿基本理论和应用技术的专著。作者根据多年对无功功率补偿的研究和实践经验,从实用角度出发,结合生产,联系实际,着重论述无功功率补偿的基本理论和典型工程实例。该书对推动国家当前正在推广的无功功率补偿工程的顺利开展将能起到重要作用。

本书内容选择上着重于:无功功率补偿的基本理论;功率因数计算及提高自然功率因数技术;无功功率补偿原理及技术经济效益分析;电力网无功功率的最优分布;电动机无功功率就地补偿技术;电力变压器的无功功率补偿技术;借无功功率补偿设备调压技术;无功功率补偿装置的设计与安装技术;无功功率补偿装置的运行技术。可供从事供用电工作者、厂矿电工、电气人员及大中专院校电力类专业的师生参考。

前 言

1995年,我国年总发电量为10000亿千瓦·时,统计线损率为8.77%,但是这个数字没有包括相当大的110千伏、35千伏、10千伏的趸售电量线损及0.38千伏的低压电网线损。据报道,估计实际的统计线损率约为15%,即1995年全国年线损电量约为1500亿千瓦·时。设全国的理论线损与统计线损相一致,其中可变线损约占理论总线损的80%,则年可变线损电量约为1200亿千瓦·时。设当前全国电力网各元件负荷的加权功率因数 $\cos\varphi_1=0.85$,采用无功功率补偿办法把电力网各元件负荷的加权功率因数提高到 $\cos\varphi_2=0.95$,则每年可以降低线损约240亿千瓦·时,按0.5元每千瓦·时计,价值约120亿元。设1995年全国电网的最大负荷利用小时数为5000小时,则电网的最大负荷约为2亿千瓦,当用无功功率补偿法把功率因数由 $\cos\varphi_1=0.85$ 提高到 $\cos\varphi_2=0.95$,全国电网需总补偿容量约为0.58亿千乏。当前无功功率补偿设备主要为电力电容器,设无功补偿设备每千乏的平均综合造价为50元,则全国无功补偿设备的总投资约为29亿元。应当指出,节省240亿千瓦·时的电能约相当于一座400万千瓦火电厂的年发电量,而建一座400万千瓦的火电厂需综合费用约300亿元,同时每年需燃煤约1200万吨,每年产生 CO_2 、 SO_2 等有害物质约600万吨。由此可见,产生相同的电力,无功功率补偿的费用约为新建电厂费用的10%,而无功功率补偿设备的费用仅约需两个月无功功率补

偿的降损节电费用即可全部回收。

应当强调指出,无功功率补偿不仅具有如上所述的节省投资、节省电力、节省燃煤及减少污染等作用,同时还可以提高电力系统设备的供电能力,改善电压质量,减少用户电费开支,延缓用户的增容改造等作用。可见,无功功率补偿能给电力系统和用户带来巨大的技术经济效益,应大力推广。

本书在对当前我国无功功率补偿问题进行全面系统分析总结的基础上,全面系统地论述了无功功率补偿的基本理论和具体应用技术。书中的许多例子、资料和数据来自科研、技改和生产线上,其中一部分例子为作者亲身经历,对当前全国正在开展的无功功率补偿工作有现实参考价值。

由于作者水平有限,书中不当之处在所难免,望读者不吝指正。

许业清

1998年2月6日于合肥

目 次

第一章 无功功率补偿的基本理论	(1)
第一节 交流电路的无功功率	(1)
一、交流电路的无功功率.....	(1)
二、关于无功功率的几点解释.....	(6)
第二节 无功功率负荷及其特点	(7)
一、异步电动机的无功功率负荷及其特点.....	(7)
二、异步电动机的功率因数曲线.....	(9)
三、变压器中的无功功率损耗及其特点.....	(11)
四、输电线路的无功损耗.....	(12)
五、无功功率负荷的电压静态特性.....	(14)
第三节 无功功率补偿设备	(15)
一、并联电容器.....	(15)
二、同步补偿机.....	(17)
三、高压输电线路的充电功率.....	(18)
四、同步电动机.....	(19)
五、同步发电机.....	(21)
第四节 无功功率平衡与电压水平的关系	(23)
第二章 功率因数计算及提高自然功率因数技术	(27)
第一节 功率因数 $\cos\varphi$ 的计算	(27)
一、功率因数 $\cos\varphi$ 的基本计算公式	(27)
二、加权功率因数 $\cos\varphi$ 的计算	(28)

三、	用秒表测量功率因数 $\cos\varphi$ 值	(29)
四、	无功功率补偿时现场功率因数 $\cos\varphi$ 的计算 办法	(31)
五、	经济功率因数 $\cos\varphi$ 的计算	(33)
六、	三相负荷不平衡时的功率因数 $\cos\varphi$ 的计算	(34)
七、	半导体变流电路功率因数 $\cos\varphi$ 的计算	(37)
第二节	提高负荷自然功率因数技术	(39)
一、	合理选择和使用电动机	(39)
二、	适当降低电动机运行电压	(41)
三、	安装空载自动断电装置	(42)
四、	提高电动机的检修质量	(42)
五、	合理选择与使用变压器	(42)
六、	调整工艺生产过程,改善设备运行制度	(43)
七、	利用 Y- Δ 变换提高自然功率因数	(43)
八、	采用电缆供电或减小架空线几何均距	(45)
九、	均衡变压器负荷	(46)
十、	停运空载变压器	(46)
十一、	调整负荷,实现均衡用电	(46)
第三章	无功功率补偿原理及技术经济效益分析	(48)
第一节	无功、电压、线损	(48)
一、	无功负荷对电压损耗的影响	(48)
二、	无功对电力网线损的影响	(50)
第二节	无功功率补偿原理	(52)
一、	无功功率补偿原理	(52)
二、	按照功率因数要求确定补偿容量	(55)

第三节	无功功率补偿的技术经济效益分析	(57)
一、	提高功率因数及相应减少电费	(57)
二、	减少电能损耗及相应减少电费	(59)
三、	增加供电功率和减少用电贴费	(60)
四、	无功补偿对电压的影响	(63)
五、	无功电量成本与无功电价	(65)
第四章	电力网无功功率的最优分布	(67)
第一节	无功功率电源的最优分布	(67)
第二节	无功功率负荷的最优补偿	(72)
第三节	确定电力网无功功率最优分布新方法	(78)
一、	确定电力网无功功率最优分布新方法	(78)
二、	确定电力网无功功率最优分布新方法算例	(80)
第四节	农电网的无功功率补偿方法	(90)
一、	农电网的无功负荷	(90)
二、	农电网中无功补偿方法的确定	(90)
三、	10/0.4 千伏配电变压器的无功补偿	(91)
四、	主变压器的无功补偿	(93)
第五节	电力网无功功率补偿设备的优化调整	(95)
一、	问题的提出	(95)
二、	电力网无功功率补偿设备优化调整算例	(95)
第六节	10 千伏配电网无功功率分散补偿方法	(98)
一、	按无功负荷的分布就近补偿	(98)
二、	力求最佳的经济效益	(98)
三、	防止轻载时间向电网倒送无功	(99)
四、	合理选择安装地点	(99)

第五章 电动机无功功率就地补偿技术	(101)
第一节 概述.....	(101)
一、无功就地补偿的优点和缺点	(101)
二、无功功率就地补偿的应用范围	(102)
三、无功功率就地补偿的接线方式	(102)
第二节 就地补偿的技术经济分析.....	(103)
一、在技术上应注意的问题	(104)
二、无功功率补偿工程投资效益分析	(106)
第三节 电动机无功功率就地补偿容量的确定.....	(108)
一、确定电动机无功就地补偿容量的若干原则	(108)
二、确定电动机就地补偿容量的步骤	(110)
三、确定电动机无功就地补偿容量算例	(112)
第六章 电力变压器的无功功率补偿技术	(123)
第一节 概述.....	(123)
第二节 高供低计用户变压器无功补偿容量的确定	(124)
一、按功率因数标准确定补偿容量	(124)
二、按供电能力要求确定补偿容量	(125)
第三节 高供高计用户变压器无功补偿容量的确定	(126)
第四节 专用线供电用户变压器最优补偿容量的 确定.....	(129)
第五节 多台变压器用户无功功率的最优分布.....	(131)
一、给定补偿电容器总容量的最优分布	(131)

二、无功功率负荷的最优补偿	(133)
第七章 借无功补偿设备调压技术	(135)
第一节 电压调整的基本原理	(135)
一、概述	(135)
二、电压调整的基本原理	(136)
第二节 借并联电容器补偿调压	(137)
第三节 借串联电容器补偿调压	(141)
第四节 放射电网串并联补偿最优容量的确定	(148)
一、问题的提出	(148)
二、串并联补偿接线方式	(148)
三、最优补偿容量的确定	(149)
四、算例	(151)
第八章 无功功率补偿装置的设计与安装	(153)
第一节 无功功率补偿方式的选择	(153)
一、集中补偿方式	(153)
二、分散就地补偿方式	(153)
三、单机就地补偿方式	(153)
四、就地补偿与集中补偿的技术经济比较	(154)
五、各种补偿方式的应用范围	(155)
第二节 无功功率补偿装置的选择	(156)
一、电容器的选择	(156)
二、放电电阻的选择	(156)
三、控制保护设备和载流元件选择	(157)
四、无功补偿装置投切方式的选择	(158)
五、无功自动补偿装置调节方式的选择	(158)

六、	无功补偿装置开关设备的选择	(158)
七、	补偿电容器组接线方式的选择	(159)
第三节	无功功率补偿装置的保护	(160)
一、	熔断器的选择	(160)
二、	电容器组的零序电压保护装置和零序电流 保护装置的选择	(161)
三、	电容器组的相间过电流保护装置和失压 保护装置的选择	(162)
第四节	无功功率补偿装置的安装	(164)
一、	电容器安装场所的选择	(164)
二、	电容器补偿装置的安装	(164)
第九章	无功功率补偿装置的运行	(167)
一、	电容器投入运行前的检查	(167)
二、	电容器补偿装置的操作	(167)
三、	防止电容器组过电压运行和限制操作过 电压	(168)
四、	限制合闸涌流的措施	(169)
五、	自愈式并联电容器安全运行	(169)
参考文献	(172)

第一章 无功功率补偿的基本理论

第一节 交流电路的无功功率

一、交流电路的无功功率

任意一两端无源网络如图 1-1 所示,电压、电流参考方向标在图中,该网络在任一瞬间吸收的瞬时功率为

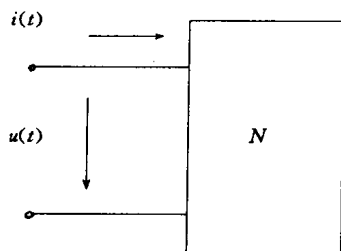


图 1-1 两端无源网络

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1-1)$$

$$\text{设 } u(t) = U_{\max} \sin \omega t = \sqrt{2} U \sin \omega t$$

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t - \varphi)$$

$$= \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi)$$

式中, φ 为电压相位与电流相位之差。

电流 $i(t)$ 可以写成

$$\begin{aligned}i(t) &= I_{\max} \sin \omega t \cos \varphi - I_{\max} \cos \omega t \sin \varphi \\&= I_{\max} \sin \omega t \cos \varphi - I_{\max} \sin \varphi \sin(\omega t - 90^\circ) \\&= i_R(t) - i_X(t)\end{aligned}$$

式中, $i_R(t) = I_{\max} \cos \varphi \sin \omega t$, 与 $u(t)$ 相位相同, 称为 $i(t)$ 的有功分量, 其模值为 $\sqrt{2} I \cos \varphi$, I 为电流有效值;

$i_X(t) = I_{\max} \sin \varphi \sin(\omega t - 90^\circ)$, 滞后 $u(t)$ 相位 90° , 称为 $i(t)$ 的无功分量, 其模值为 $\sqrt{2} I \sin \varphi$ 。

将 $u(t)$, $i(t)$ 代入式(1-1)得

$$\begin{aligned}p(t) &= u(t) [i_R(t) - i_X(t)] \\&= \sqrt{2} U \sin \omega t [\sqrt{2} I \cos \varphi \sin \omega t - \sqrt{2} I \sin \varphi \sin(\omega t - 90^\circ)] \\&= 2UI \cos \varphi \sin^2 \omega t - 2UI \sin \varphi \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) \\&= UI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) - UI \sin \varphi \sin 2\omega t \\&= P(1 - \cos 2\omega t) - Q \sin 2\omega t \\&= p_R(t) - p_X(t)\end{aligned}$$

式中, $p_R(t) = UI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t)$, 是由 $u(t)$ 和与 $u(t)$ 同相位的 $i_R(t)$ 产生的瞬时功率, 它以周期 2ω 交变, 如图 1-2 所示, 并始终大于或等于零, 其平均值为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_R(t) dt = UI \cos \varphi \quad (1-2)$$

P 反映了无源网络中等效电阻的耗能, 它用于不可逆的消耗, 数值上为 $p_R(t)$ 的平均值, 定义为有功功率。

$p_X(t) = UI \sin \varphi \sin 2\omega t$, 是由 $u(t)$ 和与滞后 $u(t)$ 90° 的 $i_X(t)$ 产生的瞬时功率, 以周期 $2\omega t$ 交变, 它用于建立磁场或静电场, 储存于电感或电容里, 并往返于电源与电感或电容之间, 如图 1-2 所示, 显然其平均值为零。此瞬时功率的幅值为 $UI \sin \varphi$, 定义为无功功率, 即

$$Q \triangleq UI \sin \varphi \quad (1-3)$$

$u(t), i(t), p(t), p_R(t), p_X(t)$ 的曲线如图 1-2。有功功率 P 及无功功率 Q 也标在图 1-2 中。

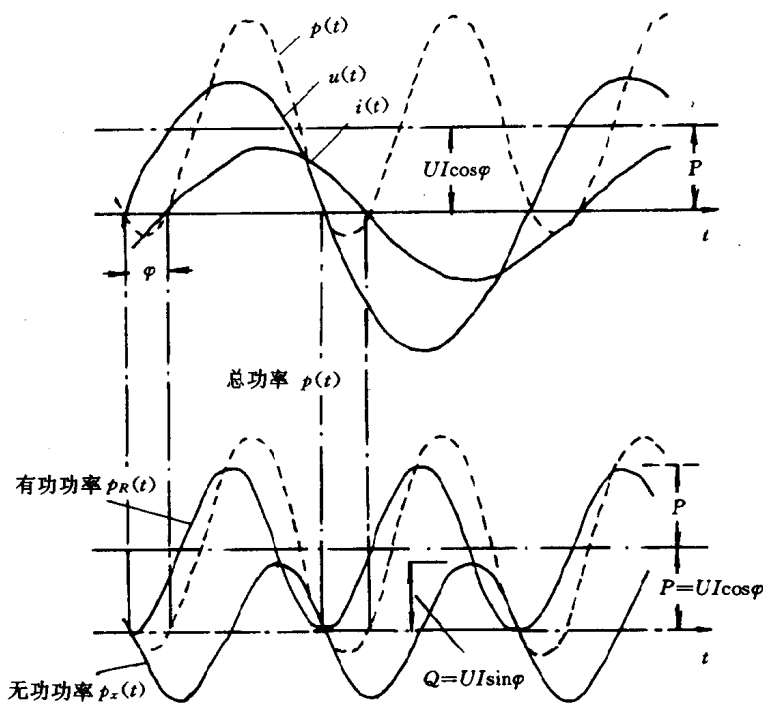


图 1-2 $u(t), i(t), p(t), p_R(t), p_X(t)$ 曲线

在电路中将 $u(t)$ 与 $i(t)$ 的有效值之积定义为视在功率，即

$$S \triangleq UI$$

由式(1-2)，式(1-3)可知

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1-4)$$

S, P, Q 三者数值上的关系可用“功率三角形”表示,如图 1-3 所示,其中 φ 角是 $u(t)$ 与 $i(t)$ 的相位差,也称为功率因数角。

由功率三角形可得

$$P = S \cos \varphi \quad (1-5)$$

$$Q = S \sin \varphi = P \tan \varphi \quad (1-6)$$

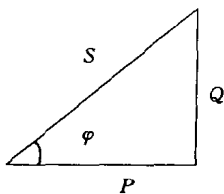


图 1-3 功率三角形

应当指出,上述关于 S, P, Q 的计算公式及功率三角形都是由单相电路得出的,对于三相电路可以得到相似的计算公式,即

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

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3} UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

无功功率 Q 的物理意义还可以通过下面的例子来进一步说明。

例 1-1 设一两端无源网络如图 1-4 所示,图中 $Z = j\omega L$

- (1) 计算无功功率 Q ;
- (2) 计算电感 L 吸收的瞬时功率;
- (3) 比较以上结果。

解 (1) 因为 $Z = j\omega L$ 为纯电抗电路,故 $\varphi = 90^\circ$,由式(1-3)可以得到

$$Q = UI \sin \varphi = UI$$

又 $U = \omega LI$

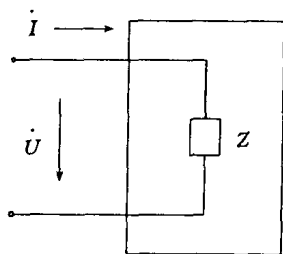


图 1-4 例 1-1 图

故

$$Q=UI=\omega LI^2$$

则

(2) 设流入无源网络的电流为 $i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi)$,

$$u(t) = L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} \omega LI \cos(\omega t + \varphi)$$

$$\begin{aligned} p(t) &= u(t)i(t) = 2\omega LI^2 \sin(\omega t + \varphi) \cos(\omega t + \varphi) \\ &= \omega LI^2 \sin 2(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

(3) 比较(1),(2)的结果可得

$$p(t) = Q \sin 2(\omega t + \varphi)$$

如前所述, $p(t)$ 在一个周期内的平均值为零。可见, 该网络中没有电阻, 只有电抗, 故只吸收无功功率, Q 是电感的瞬时功率的最大值, 即电感与电源之间能量交换率的最大值。

在这个例子中, 虽然送到电感中的平均功率是零, 但仍然有一个瞬时功率送到电感中。这个功率随时间作正弦变化, 时而吸收功率, 时而放出功率, 反映了电感与外电源有能量交换。这个瞬时功率的实质是为了支撑电感 L 的磁场能量的变化, 它的最大值即为无功功率。

由以上分析可知, 有功功率是一平均值, 为无源网络所消耗的功率。无功功率是一个交换功率的幅值, 它虽然没有为网络所“消耗”, 但它反映了网络内部与外部交换能量的能力的大小。

当网络中电压超前电流时, $\varphi > 0$, 则网络中为感性, 无功功率 $Q > 0$, 习惯上理解为网络“吸收”感性无功功率, 相当于“发出”容性无功功率; 若网络中电流超前电压时, $\varphi < 0$, 则网络中为容性, 无功功率 $Q < 0$, 习惯上理解为网络“吸收”容性无功功率, 相当于网络“发出”感性无功功率。“发出”与“吸收”无功功率的意义不同于有功功率的吸收和发出, 这里只是