

王合贞 编著

高压并联电容器 无功补偿 实用技术



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

高压并联电容器 无功补偿 实用技术

王合贞 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为了提高电网的无功、电压和线损管理工作的技术水平,提高技术人员的理论知识与实际工作能力,解决电网调压和无功补偿问题,特编写了《高压并联电容器无功补偿实用技术》一书。

全书内容共分为11章,分别是:无功、电压、线损及并联电容器补偿,并联电容器及其制造工艺,干式空心电抗器,保护并联电容器的氧化锌避雷器,并联电容器的试验,并联电容器组的合闸涌流、分闸过电压和真空断路器,并联电容器的运行维护,高次谐波及其对并联电容补偿装置的影响,大容量并联电容器的谐波放大及其抑制措施,串联电抗器的应用,模拟工程实践。

本书可以作为从事电容器设计、运行、维修人员的专业培训教材,也可作为实际工作中的技术参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压并联电容器无功补偿实用技术/王合贞编著. 北京:中国电力出版社, 2006

ISBN 7-5083-4544-4

I. 高... II. 王... III. 高压电容器: 移相电容器-无功补偿 IV. TM531.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第076850号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006年9月第一版 2006年9月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 5.25印张 113千字

印数 0001—3000册 定价 12.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

随着电力体制改革的不断深入进行，电网也将随着工、农业生产的发展而不断扩大，随之而来的电网调压和无功补偿问题将是电网工作的重要组成部分，而且会成为电网管理中的突出问题，这就需要一大批具有专业技术能力的工作者下大力气去做好这一项工作。

为了提高电网的无功、电压和线损管理工作的技术水平，满足从事这方面工作的技术人员对提高理论水平和实际工作能力的要求，编者在总结过去工作的基础上，汇集整理了本书。

本书既可以作为专业培训资料，也可以作为实际工作中的技术参考。因为水平所限，在内容、编排上不合理之处在所难免，恳请广大读者批评指正，提出宝贵的修改意见。

希望通过对本书的阅读和使用，能够使专业技术工作者在理论上和实际工作能力上得到提高，以促进电网的无功、电压和线损管理工作的技术水平的提高，适应电网的发展和电网建设的需要！

编 者

2006 年 7 月

目 录

前言

第 1 章	无功、电压、线损及并联电容器补偿 <	1
第 2 章	并联电容器及其制造工艺 <	15
第 3 章	干式空心电抗器 <	30
第 4 章	保护并联电容器的氧化锌避雷器 <	39
第 5 章	并联电容器的试验 <	46
第 6 章	并联电容器组的合闸涌流、分闸过电压 和真空断路器 <	51
第 7 章	并联电容器的运行维护 <	61
第 8 章	高次谐波及其对并联电容补偿装置的影响 <	78
第 9 章	大容量并联电容器的谐波放大及其 抑制措施 <	122
第 10 章	串联电抗器的应用 <	135
第 11 章	模拟工程实践 <	149
	参考文献 <	160

无功、电压、线损及并联电容器补偿

本章摘要：本章简要介绍了无功、电压、线损及并联电容器补偿的基本知识。

1.1 无功功率的物理概念 <<

如图 1-1 所示的串联电路：在 R、L、C 串联回路中，设电路两端电压 $u = \sqrt{2}U \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ ；回路电流 $i = \sqrt{2}I \cdot \sin \omega t$ ，那么，在某一瞬间输入电路的瞬时功率 P 为

$$\begin{aligned} P &= ui = 2UI \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot \sin \omega t \\ &= 2UI \cdot (\sin \omega t \cdot \cos \varphi + \cos \omega t \cdot \sin \varphi) \cdot \sin \omega t \\ &= 2UI \cdot (\sin^2 \omega t \cdot \cos \varphi + \cos \omega t \sin \omega t \cdot \sin \varphi) \\ &= 2UI \cdot \cos \varphi \cdot \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} + 2UI \cdot \frac{\sin 2\omega t}{2} \cdot \sin \varphi \\ &= UI \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \cos 2\omega t) + UI \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (1-1)$$

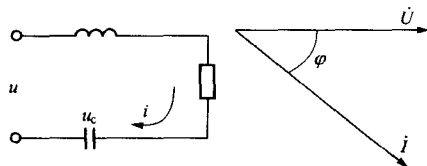


图 1-1 RLC 电路原理图

式中 U 、 I ——电压、电流的有效值；

φ 、 t ——初相角和时间。

式 (1-1) 实际上是由两部分组成。

$$(1) P_r = UI \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \cos 2\omega t) \quad (1-2)$$

为有功分量 (余弦分量)。

$$(2) P_x = UI \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t \quad (1-3)$$

为无功分量 (正弦分量)。

下面就初相角 φ 为不同情况时进行讨论。

(1) 当 $|\varphi| = 0$ ，为纯电阻电路。

电压与电流初相角一致。式 (1-3) 显然等于零。式 (1-2) 中， $P_r = UI \cdot (1 - \cos 2\omega t)$ ，那么在一个全周期 T 内电路消耗的平均电能

$$\bar{W} = \int_0^T UI \cdot (1 - \cos 2\omega t) dt$$

$$\text{因为} \quad \omega T = 2\pi \quad (1-4)$$

$$\text{所以积分后} \quad \bar{W} = UI t \Big|_0^T - \frac{UI}{2\omega} \sin 2\omega t \Big|_0^T = UIT$$

(2) 当 $|\varphi| = \frac{\pi}{2}$ 时，为纯电容或纯电感电路。

此时式 (1-1) 的有功分量 $P_r = 0$ ， $P = P_x = UI \cdot \sin 2\omega t$ ，电路在一个全周期 T 内消耗的平均电能

$$\bar{W} = \int_0^T P_x dt = \frac{-UI}{2\omega} \cos 2\omega t \Big|_0^T = -\frac{UI}{\omega} (\cos 4\pi - 1) = 0$$

即电路不消耗电能，其物理意义是：电路内瞬时功率从无到有，时正（在 $1/4$ 周期时最大）时负（在 $3/4$ 周期时最大），全周期内平均值为零，电路本身并不消耗电能，只是

在电容器、电感无件、电源之间进行着能量交换。时儿由电源将能量传递给电容和电感元件，将能量转换为电场或电磁能储存起来，时儿又由该元件将储存的电能送回电源。但应该指出，在与电源进行能量交换的过程中，电流在电路中流通，仍然是要消耗有功电能的。

(3) 当 $0 < |\varphi| < \frac{\pi}{2}$ 时，此时既有电阻，也有电感、电容，更接近于实际的电路。

$$\begin{aligned}\bar{P} &= \int_0^T P dt = \int_0^T [UI \cdot \cos\varphi \cdot (1 - \cos 2\omega t) + UI \cdot \sin 2\omega t \cdot \sin\varphi] dt \\ &= UI \cdot \cos\varphi \cdot t \Big|_0^T - \frac{UI}{2\omega} \cos\varphi \cdot \sin 2\omega t \Big|_0^T - \frac{UI \cdot \sin\varphi}{2\omega} \cdot \cos 2\omega t \Big|_0^T \\ &= UIT \cdot \cos\varphi\end{aligned}$$

(1-5)

物理意义：这是介于上述两种情况下，既有电阻上的电能消耗分量 $UI \cdot \cos\varphi = P$ ；同时也有电源与电路间的电磁场能量转换分量 $UI \cdot \sin\varphi \cdot \sin 2\omega t$ ，能量交换的幅值为 $UI \cdot \sin\varphi = Q$ ； Q 是用来衡量电路能量交换大小的一个物理量，具有和有功率 $P = UI \cdot \cos\varphi$ 相同的量纲和表征形式。

总之，无功功率是在电路中建立电压、建立电磁场，从而传递、转换有功功率，保证电力系统和用电设备正常运转所必不可少的能量形式。在实际工作中，应充分利用电容、电感互补的特性，以减少能量损失，提高电能质量和经济效益。

电力系统中的无功功率就像维持机械系统运转的润滑油，没有润滑的机械系统将不能维持做“功”；无功功率又像经济市场中的货币，没有货币的经济市场是难以维继的。

以上的这两种比喻，非常形象地描绘出了无功功率在电力系统中的作用。

1.2 无功、电压 <<

1.2.1 电力系统中的无功电源和无功负荷

在电力系统正常运行中，无功功率是表征电源与储能元件间的瞬间能量交换。正常运行方式下的发电机都被认为是发出无功功率，那么我们约定凡是无功功率方向与其相同的、都被认为是在发出无功功率，称为无功电源，反之称为无功负荷。

无功电源主要包括：同步发电机、同步调相机、过励磁的同步电动机、并联电容器、高压架空线充电电容等。

无功负荷主要包括：变压器、输电线路、异步电动机、欠励磁状态下的调相机、进相运行的发电机、并联电抗器以及其他用电设备。

静止补偿器既可作为无功电源也可以作为无功负荷使用。

1.2.2 无功负荷的电压静态特性

无功负荷随电网电压、频率变化的特性称其为静态特性，由于电网频率比较稳定，所以某一时刻无功负荷的变化，主要影响电压的波动，所以又称为无功负荷的电压静态特性。

最大量、最基本的无功负荷是异步电动机。就电网结构而言，可将研究对象拓展为某一个供（配）电区域，其中包

括：变压器、线路、异步电动机、照明设施、整流设备、家用电器等综合性无功负荷，还可以将无功补偿设备的出力变化情况包括进去，一并研究。一般研究的电压静态特性就是指这些无功负荷随电压变化的特性。例如，通过对多个有代表性的区域所进行的负荷的电压静态特性试验，结合用电结构绘制出负荷的电压静态特性曲线，其主要内容列于表 1-1 中。

表 1-1 某地区综合负荷电压静态特性

负荷 调节效应	有功部分	无 功 部 分	
		负荷端无电容补偿	负荷端有电容补偿
负荷的电压 调节效应	当 $U_* = 1$ 时， $\frac{dP_*}{dU_*} = 0.85$	当 $U_* = 1$ 时， $\frac{dQ_*}{dU_*} = 3.15$	当 $U_* = 1$ 时， $\frac{dQ_*}{dU_*} = 3.95$

即某地区电压每提高（或降低）1%时，用户吸收的无功负荷增加（或减少）3.15%，计及无功补偿效果后其变化量增加为 3.95%。

当然，不同负荷的用电结构和不同网络结构地区的电压静态特性是不一样的。但是实际的测试结果说明无功功率的变化对电压的影响是很大的，这一点可以肯定。

1.2.3 无功功率平衡

电网的无功功率和有功功率一样，发生和消耗是同时完成的，所以在任何时刻无功功率总是应该平衡的。当一种平衡因为某种原因被破坏后，例如发电机发出的无功功率增加（或减少），将使电网的电压升高（或降低），不同区域的无功负荷将按其已有的静态电压特性增加（或减少）吸收电网

的无功功率，使其形成新的平衡。本次平衡与上次平衡的主要区别在于，二者是建立在不同的电压水平下的平衡。而所谓无功功率不足或过剩即指在某一目标电压下的不足或过剩，例如有些地区 110kV 系统负荷低谷时，电压曾高达 118~121kV（甚至更高），若与目标电压 110~116kV 相比较，即可称之为无功功率过剩。

一些地区无功功率不足并非经常不足，而是指大多数方式下的以及负荷高峰方式下的不足，而在低谷负荷时也可能出现无功功率过剩。即负荷高峰时缺少无功功率因而电压偏低；而负荷低谷时无功功率过剩因而电压又偏高。

就无功功率平衡而言，不管是对整个电网、还是对某个局部地区，高压并联电容器在无功功率平衡方面都发挥着“主力军”的作用。整个电网安装的高压并联电容器的补偿容量要远大于电网发电机的总容量。因此管理好、应用好本地区的高压并联电容器，是进行和实现本地区无功功率平衡的首选手段。

1.2.4 无功功率、电压对用电设备的影响

无功功率不足或过剩都将造成实际电压与目标电压的较大差别，从而影响用电设备的使用寿命和使用效益。根据相关资料介绍：

(1) 白炽灯：电压升高 5%，寿命缩短 30%~40%；电压降低 1%，照明度下降 3%。

(2) 日光灯：电压变动 1%，照明度变化 1%~2%；低电压时，启动频繁，寿命下降，高电压时，镇流器趋于饱和，加速老化，灯丝电流增大、寿命缩短。

(3) 感应电动机：负荷率低于等于 50%时，效率随电

压下降(10%以内)而升高;负荷率为75%时,额定电压下效率最高;额定负载下最高效率出现在1.0~1.05倍额定电压时。电压过低时,电流增大,出现过热、加速老化,甚至烧毁设备;电压过高时,铁芯过热,损坏绝缘,甚至造成局部击穿。如电压波动太大,会造成转速不均,生产的产品质量下降。

(4) 电压过高时,将导致铁磁设备的磁饱和造成电压波形的畸变,产生电网谐波,危害电网和用电设备的安全运行。

总之,电压过高、过低或波动过大都将造成不可估量的损失,甚至危及电力系统的安全、稳定运行。因此地区电网的无功功率在额定电压附近趋于平衡是十分重要的。

1.2.5 无功功率对电压的影响

无功功率不足,电压下降;无功功率过剩,电压升高,其上升或下降的幅度由各地区电网负荷的综合电压静态特性决定。无功功率在电网中流动将产生系统压降,造成电压偏移。其计算的表达式为

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \times 10^{-3} (\text{kV}) \quad (1-6)$$

略去横向分量 $P \cdot R$ (影响较小) 的简化实用算法为

$$\Delta U = \frac{Q \cdot X}{U} \times 10^{-3} (\text{kV}) \quad (1-7)$$

式中 U ——计算点线电压 (kV);

Q ——无功负荷 (kvar);

X ——系统电抗 (Ω)。

其中,线路电抗 X 可从使用手册中查出。变压器电抗

$$X = \frac{U_k(\%)^2}{S_N} \quad (1-8)$$

式中 S_N ——变压器额定容量 (kVA);

$U_k(\%)$ ——变压器短路电压百分数。

可以看出线路中流动的无功功率 Q 愈大, 由此所造成的系统电压降落 ΔU 也愈大。因无功负荷的变化而导致了线路和变压器的压降变化, 要具体指出电网中哪一点、哪一条母线的变化量是多少, 就目前的技术水平来说并不是一件困难的事情, 但通常采用简化公式

$$\frac{\Delta U}{U} = (\pm) \frac{\Delta Q}{S_k} \quad (1-9)$$

来估算某变电站、某条母线因无功功率补偿容量 (或无功负荷) 的变化量而引起的电压的变化量。式 (1-9) 中 S_k 为该母线 (或电网某节点) 的短路容量, 正号表示补偿电容器或其他无功电源的增加量, 负号表示无功负荷的增加量。无功负荷增大, 电压下降; 无功电源增大, 电压升高。

1.2.6 改善电压质量对无功功率的要求

为改善电压质量, 对无功功率有如下要求:

(1) 在任何目标电压下确保无功功率达到平衡。这就要求有足够的无功功率补偿容量和完好的备用容量 (可调投入容量), 以满足不同方式下的无功功率需求。同时还应有较好的无功功率调节能力, 特别是担负电网重要直供或转供任务的枢纽变电站, 应有无功功率的正、负调节能力。

(2) 实现分电压等级和无功功率就地的平衡。由于设备方面的原因, 目前按电压等级的无功功率平衡较难做到。但是可以做到无功功率负荷的就地、就近补偿, 以减少电网无

功功率的远距离传输，减少电网损耗，增加电网效益。

(3) 按逆向调压方式的要求实现无功功率平衡。由于高峰负荷时无功负荷大，无功电源到负荷点的电压降落也大，因此电网电压普遍较低。低谷负荷时往往无功负荷较小，电网电压较高。所以，为使负荷端电压稳定，需要对无功电源的电压进行逆向调整。即高峰负荷时的电压要高一点，低谷负荷时的电压要低一点，以这种逆向调整方式来确定目标电压，在这个目标电压下，实现无功功率平衡。这样对系统的无功电源、就地的无功功率补偿、无功功率补偿的细分调节、枢纽变电站的电压调节，以及相关因素之间的相互配合调整都提出了较高的要求。

1.3 无功功率和线损 <<

电能从发电厂传输到用电设备，在输变电设备中所产生的有功功率（电量）损耗叫电网损耗，简称线损。它是表征整个电网建设、管理、运行水平的一个重要的综合指标。高压电网的合理线损率在 3% 左右变化，降低线损对提高电网企业自身效益和社会效益有着重要的意义。

在整个电网的线损构成中，约有 80% 的电能是在输变电过程中因线路、变压器设备自身固有的电阻的存在而消耗掉的，即所谓的硬损耗。另外约 20% 主要是因为管理不严、电能损失和变电站（变）自身用电消耗的电能，即所谓的软损耗。硬损耗需要通过网络改造、采用经济的运行方式、加强无功功率补偿等措施来实现改进。而软损耗主要是通过加强管理，来实现减少损耗。硬损耗又包括可变损耗 ΔP_v 和不变损耗 ΔP_f 两部分，可用下式计算

$$\begin{aligned}\Delta P_L &= \Delta P_v + \Delta P_f = 3I^2 R \times 10^{-3} + \Delta P_{0T} \\ &= \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \times R \times 10^{-3} + P_0 \left(\frac{f}{50} \right)^{1.2 \sim 1.3} \cdot \left(\frac{U}{U'} \right)^2 \quad (1-10)\end{aligned}$$

式中 ΔP_v 、 ΔP_f ——分别为可变、不变损耗 (kW)。

P_{0T} ——变压器空载损耗 (kW)。

R ——线路、变压器的电阻 (Ω)。

P_0 ——变压器在额定频率、额定电压下的实测损耗 (kW)。

U 、 U' ——分别为电网实际电压和主变压器抽头电压 (kV)。

P 、 Q ——系统传输功率 (kW、kvar)。

f ——系统运行频率 (Hz)。

由式 (1-10) 可以看出, 构成电网电能损耗的主要部分是与线路、变压器的负荷 (电流) 有关的可变损耗 ΔP_v 和变压器的空载固定损耗 ΔP_f 两部分组成。前者与负荷电流 I 的二次方成正比, 后者与实际所加电压 U 的二次方成正比。当 $\Delta P_v = \Delta P_f$ 时, 可以认为在这种电网损耗结构的情况下, 此时正在执行的运行方式是该电网最经济的运行方式。当 $\Delta P_v < \Delta P_f$ 时, 如果输送功率 P 不变, 单纯为了减小传输电流而提高电压运行 U , 不仅不能降低电网损耗, 而且会增大损耗。这种情况在配电网中, 特别是农网中比较常见。例如: 美国南加州爱迪生公司先后对其所属的 18 个变电站进行的长期试验测量数据表明, 降低配电网运行电压的 2%~3% 可降低电网损耗 1%~4%, 因此该公司决定将配网运行电压降低 2%~3%。

通常所说的主变压器固定损耗, 是指在某一电压等级下的不随负荷变化而变化的那一部分损耗, 可视其为不变损

耗。

通过对河南省某些区域的线损计算统计（见表 1-2）表明：在 35kV 及以上的电网系统中，主变压器空载损耗所占比例均不大，都不超过 35%，提高电压会降低损耗。

表 1-2 河南省（某年）部分地区 35kV 及以上
电网线损计算统计 (MW、Mvar)

序号	单 位	计算负荷	有功功率 总损耗		其中：①可变 损耗		②不变损耗	
			数值	损失率 (%)	数值	占总比 重(%)	数值	占总比 重(%)
1	新乡 供电局	197.4+j85.7	5.41	2.74	4.48	82.6	0.93	17.2
2	安阳 供电局	279.4+j181	7.81	2.80	6.22	79.6	1.59	20.4
3	南阳 地电局	172.7+j118.1	5.23	3.03	4.89	93.5	0.34	6.5

其中对某一配电线路的统计分析数据为：配电变压器总台数 67；总容量 4240kVA；首端计算负荷 $2.1+j0.8$ 。

总损耗 0.2MW；其中可变损耗 0.13MW，占 65%；不变损耗占 35%。

电网中的无功功率对损耗的影响可归纳为以下两个方面：

(1) 直接影响。无功功率与有功功率一样，在电网中传输时直接产生损耗（即 $I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U}$ 中含有 Q 的成分）。通

常用功率因数 $\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$ 来衡量。当 $\cos \varphi = 0.7$ 时,

$P \approx Q$, 可变损耗 ΔP_v 中无功功率和有功功率影响各占一半。因此减少无功功率在电网中的传输、提高电网潮流的功率因数对降损节能有重大意义。

(2) 间接影响。无功功率的不平衡影响着电压的不平衡, 在可变损耗大于不变损耗时, 提高电网电压对降损有利。低谷负荷时的有些网络, 特别是农网、配电网的不变损耗、通常大于可变损耗, 提高电压一般只能增加损耗 (是增加还是减少要看可变损耗的减少是否能与不变损耗的增加相抵消), 具体结论应该通过详细的理论计算和试验实测数据来加以证明。因此, 线损理论计算工作的意义不仅在于进行线损构成的分析, 也关系到确定合理的运行方式、调压方式、无功功率补偿方式等因素的相互配合。认为提高运行电压可降低损耗的观点, 至少在未弄清本局域网的可变损耗与不变损耗的构成之前是不正确的。

1.4 无功功率补偿的基本原则 <<

根据《国家电网公司电力系统无功补偿配置技术原则》(2005—01): 各电压等级的变电站应结合电网规划和电源建设, 合理配置适当规模、类型的无功功率补偿装置。所装设的无功功率补偿装置应不引起系统谐波明显放大, 并应避免大量的无功功率穿越变压器。35~220kV 变电站, 在主变压器最大负荷时, 其高压侧功率因数应不低于 0.95, 在低谷负荷时功率因数应不高于 0.950。

无功功率补偿的基本原则是在电网无功功率平衡的基础