

城乡电力网 无功补偿技术

李致恒
李海钧
陆孟君

水利电力出版社



城乡电力网无功补偿技术

李致恒 李海钧 陆孟君

※

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

※

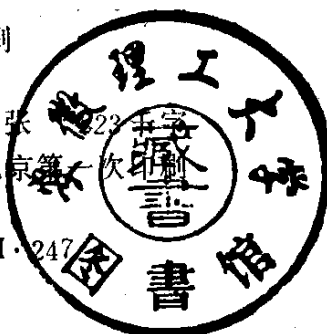
787×1092毫米 32开本 10.25印张

1989年12月第一版 1989年12月北京第一次印刷

印数 0001—4630册

ISBN 7-120-00869-2/TM·247

定价4.00元



内 容 提 要

本书系统地介绍了无功电力的基本知识，阐述了无功电力规划的方法，并就无功补偿装置的设计、安装、运行和管理诸方面作了详细的论述，还介绍了无功补偿方面的新设备和新技术。书中内容丰富，理论结合实际，深入浅出，并附有计算实例和图表，方便应用。

本书可供城乡电网、工矿企业电气技术人员和广大电工阅读，也可作为各类无功补偿讲习班的培训教材。

前 言

目前我国电力工业的发展突飞猛进，全国装机容量、电力设施的增长是以前所未有的高速度发展着。但是城乡电网无功电力规划、建设、管理工作仍然比较薄弱，存在着无功缺额大、功率因数低、线损高、电压质量差、无功补偿自动化程度低等问题。希望本书的出版，能在普及电网无功补偿技术方面起到宣传、指导和积极推动作用。

本书前几章系统地介绍了无功电力的基础理论和基本知识，后几章阐述了无功电力的规划方法，无功补偿装置的设计、安装、保护、运行管理的方法，并列出了国外部分无功补偿新设备、新技术资料。

本书第一章至第四章由李海钧和李致恒编写，第五章至第八章由陆孟君编写。李致恒为本书统稿人。

本书编写提纲由林虔审阅，书稿由石永海审阅。

本书内容具体、丰富，理论联系实际，语言通俗简练。本书可供城乡电网、工矿企业电气技术人员和广大电工阅读，亦可作为各类无功补偿讲习班的培训教材。

由于我们的理论水平和实践经验的局限性，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

作者

1988年9月

目 录

前 言

第一章 无功电力的基本知识 (1)

第一节 无功电力的性能与作用 (1)

一、无功电力的基本概念 (1)

二、无功电力与电压 (6)

三、无功电力与线损 (10)

第二节 电力网中的无功电源 (13)

一、同步发电机 (13)

二、输电线路的充电功率 (14)

三、从网外输入的无功功率 (15)

四、并联电容器 (19)

五、其它无功补偿设备 (24)

第三节 电力网中的无功负荷 (26)

一、电动机的无功功率损耗 (26)

二、变压器的无功功率损耗 (27)

三、线路中的无功功率损耗 (31)

第四节 负荷的功率因数 (36)

一、负荷的自然功率因数 (36)

二、有关功率因数的规定 (38)

三、功率因数的实测与计算 (42)

第二章 电力网的无功电力规划 (46)

第一节 无功电力规划的重要性 (46)

第二节 无功电力平衡 (47)

第三节 无功电力规划的编制方法	(48)
第四节 无功补偿设备的配置原则	(51)
一、无功负荷的构成与分析	(51)
二、无功补偿设备的合理配置原则	(52)
第三章 电力网无功负荷的合理补偿	(55)
第一节 县级电力网无功负荷的最优补偿	(55)
一、最优网损微增率准则	(55)
二、等网损微增率准则	(58)
三、应用两个“准则”进行计算的实例	(60)
第二节 配电线路无功负荷的最优补偿	(65)
一、负荷集中于线路末端	(66)
二、负荷均匀分布的线路	(66)
三、负荷非均匀分布的线路	(71)
第三节 变电站无功负荷的最优补偿	(79)
一、变电站补偿容量的确定	(80)
二、按调压要求确定补偿容量	(81)
第四节 电力用户无功负荷的最优补偿	(84)
一、电力用户无功补偿的最优方式	(84)
二、电力用户最优补偿容量的确定	(89)
三、单台电动机补偿容量的确定	(97)
第四章 无功补偿的降损节能效益	(99)
第一节 提高发供电设备效率	(99)
一、增加线路供电能力	(99)
二、提高变压器供电能力	(100)
三、提高发电机有功出力	(101)
第二节 降低功率损耗与电能损耗	(102)
第三节 减少变配电设备投资	(104)

第四节	提高供电电压质量	(106)
第五节	减少电费支出	(107)
第五章	高压并联电容器组的接线与安装	(111)
第一节	高压并联电容器组的接线	(111)
一、	高压电容器组的接线方式	(111)
二、	高压电容器组接线方式的选择	(116)
第二节	高压电容器组的排列	(123)
一、	电容器组排列的原则	(123)
二、	电容器组的排列方式	(123)
三、	电容器组各种排列方案的优缺点	(125)
第三节	高压电容器组的安装	(128)
一、	电容器的运输和存放	(128)
二、	户内电容器组的安装	(129)
三、	户外电容器组的安装	(145)
四、	半露天式电容器组的安装	(146)
第四节	电容器室通风计算和建筑要求	(152)
一、	电容器室通风要求	(152)
二、	电容器室通风量计算	(153)
第六章	高压电容器组的控制与保护	(157)
第一节	高压电容器组的控制	(157)
第二节	高压电容器组的保护	(157)
一、	高压电容器组保护的原则和要求	(157)
二、	电容器组常用的保护装置	(158)
第三节	电容器的熔断器保护	(162)
一、	电容器的内熔丝保护	(162)
二、	电容器组的熔断器保护	(165)
第四节	电容器组的相间过电流保护	(172)

一、电容器组的定时限过电流保护	(172)
二、电容器组的反时限过电流保护	(176)
第五节 电容器组的过负荷保护	(176)
第六节 电容器内部层间短路的保护	
——平衡保护	(177)
一、电容器组的零序电流保护	(178)
二、电容器组的相差动电流保护	(183)
三、电容器组的开口三角形电压保护	(191)
四、电容器组的中性线电流平衡保护	(196)
第七节 电容器组的过电压保护	(205)
第八节 电容器组的失压保护	(206)
第九节 电容器组的单相接地保护	(207)
第十节 电容器组的防雷保护	(208)
第十一节 电容器组的放电装置	(209)
一、放电装置的工作原理	(209)
二、放电装置的形式和原理接线	(210)
三、放电装置应满足的几个条件	(213)
四、放电装置的放电电阻及放电时间的计算	(213)
第十二节 电容器组开关设备的选择	(216)
一、电容器组开关的选择原则	(216)
二、各类断路器开合电容器组的试验结果	(219)
三、推荐几种断路器	(222)
第十三节 高压电容器组的自动投切装置	(228)
一、国内外自动投切装置的使用情况	(228)
二、电容器组自动投切装置的分类	(230)
三、自动投切装置的应用	(231)
第十四节 高压电容器组成套补偿装置	(236)
一、成套补偿装置的设计原则	(236)
二、成套装置容量等级分档	(238)

三、成套装置的应用	(239)
第七章 高压电容器组的运行管理	(246)
第一节 户内电容器组的运行管理	(246)
一、新装电容器组投运前的检查	(246)
二、电容器组运行管理的要点	(247)
三、电容器组的维护和检修	(249)
四、保护装置的运行	(250)
第二节 户内电容器组的电压监视	(251)
一、电容器过电压能力的规定	(251)
二、运行电压升高对电容器寿命的影响	(252)
三、电容器过电压产生的机理和限制措施	(253)
第三节 户内电容器组的电流监视	(255)
一、电容器的过电流限额	(255)
二、电容器过电流产生的原因和限制措施	(255)
第四节 电容器运行中对温度的监视	(256)
一、电容器的环境温度	(256)
二、电容器外壳温度的监视	(258)
三、示温蜡片的配方和使用要求	(259)
第五节 电容器的试验项目和标准	(260)
一、电容器安装后的交接试验	(260)
二、电容器运行中的预防性试验项目和周期	(261)
三、故障电容器的检查和鉴定性试验	(261)
四、电容器大修前后的鉴定性试验	(261)
第六节 电容器组的反事故技术措施	(262)
一、电容器损坏的原因分析和防止措施	(262)
二、电容器的合闸涌流和防止措施	(266)
三、电容器的谐振过电压和防止措施	(273)

第七节 户外式电容器组的运行管理	(275)
第八章 低压电力网的无功补偿	(276)
第一节 低压电容器组的接线	(276)
一、低压电容器组的接线方式	(276)
二、低压电容器组的排列方式	(279)
第二节 低压电容器组的安装	(280)
一、户内式低压电容器组的安装	(280)
二、户外式低压电容器组的安装	(281)
第三节 低压电容器组的控制与保护	(282)
一、控制设备的选择	(282)
二、低压电容器组的保护方式	(284)
三、低压电容器组的放电装置	(284)
第四节 低压电容器组的自动投切装置	(288)
一、低压电容器组自动投切装置的分类	(288)
二、自动投切装置的设计原则	(288)
三、低压电容器组自动投切的应用实例	(289)
四、低压电容器组的成套补偿装置	(291)
第五节 低压电容器组的运行管理	(294)
一、低压电容器的运行	(294)
二、低压电容器的试验检查	(297)
三、低压电容器组的维护管理	(297)
附录一 国产并联电容器规格、型号表	(298)
附录二 国产并联电容器外形尺寸图	(306)
参考文献	(316)

第一章 无功电力的基本知识

第一节 无功电力的性能与作用

一、无功电力的基本概念

电工学告诉我们，在电力生产中，发电机输出的功率有两种，一种是有功功率，另一种是无功功率。在交流电能输送和使用过程中，用于转换成机械能、热能、光能等的那部分能量叫做有功功率；用于电路内电场与磁场交换的那部分能量叫做无功功率。

由于电力的生产和使用是同时完成的，所以应该把电能传输和电力负荷联系起来分析。电力网的负荷一般分为三种，即电阻性、电感性和电容性负荷。这三种负荷的电路图、波形图和相量图分别如图 1-1、图 1-2 和图 1-3 所示。

(1) 在电阻性负荷（如电灯、电热丝等）电路里，电流和电压的相位相同，当电压达到最大值时，其电流也同时达到最大值。电流在通过电阻的过程中做了功，把电能转换成光能、热能等，能量被消耗掉了，所以说电阻性负荷总是消耗电能的，因而电阻性负荷又称为有功负荷，所消耗的功率叫做有功功率。

(2) 在电感性负荷（如空载运行的变压器、异步电动机等）的电路里通过电流时，在其线圈的周围就会建立起交变磁场（电生磁），而这个交变磁场又会在自己的电路里感应起电势（磁生电），这个电势叫做自感电势（也叫反电势），它在电路中有阻止原电流变化的作用。当电流增加时，自感

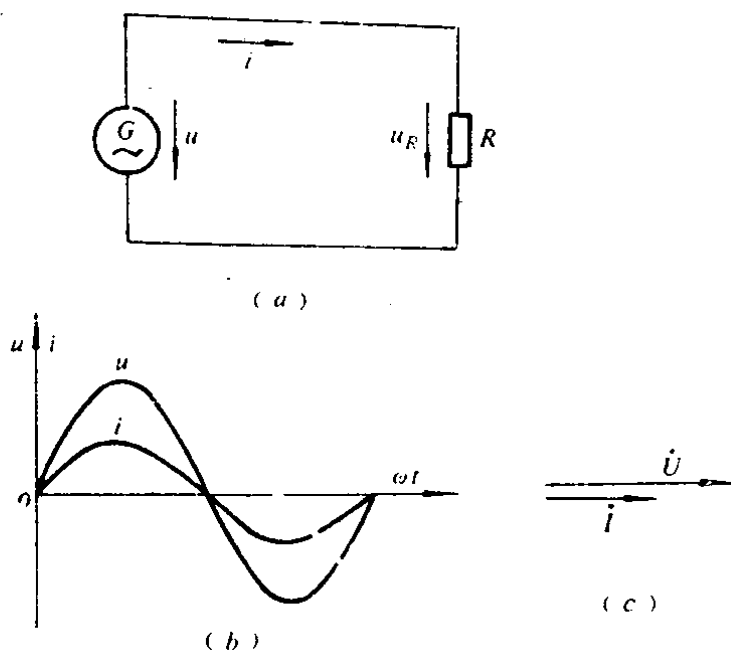


图 1-1 电阻电路图
(a) 电路图; (b) 波形图; (c) 相量图

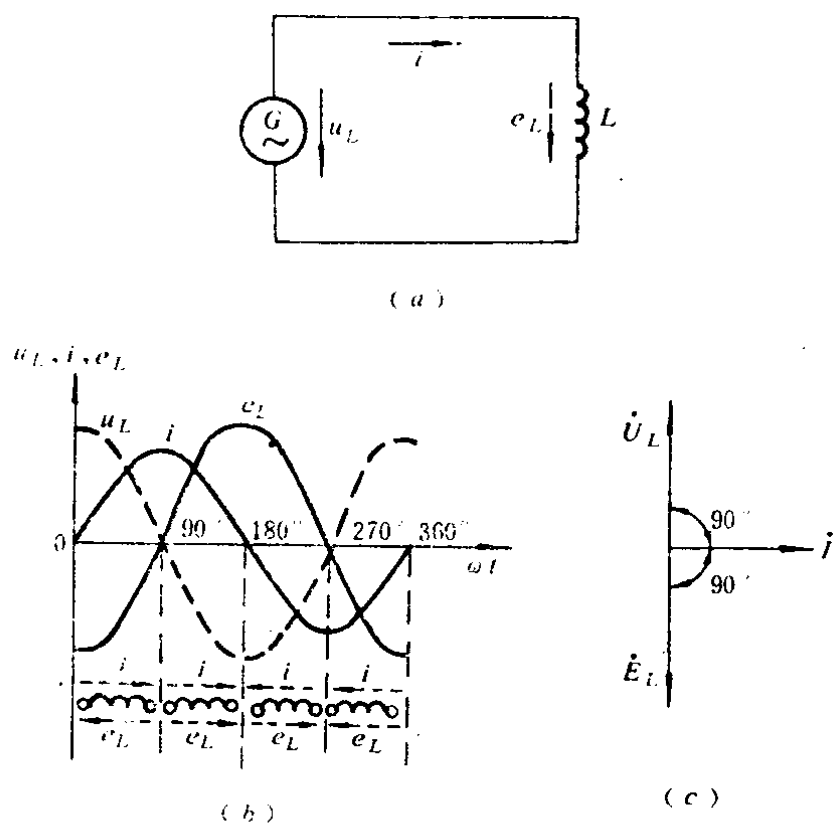


图 1-2 电感电路图
(a) 电路图; (b) 波形图; (c) 相量图

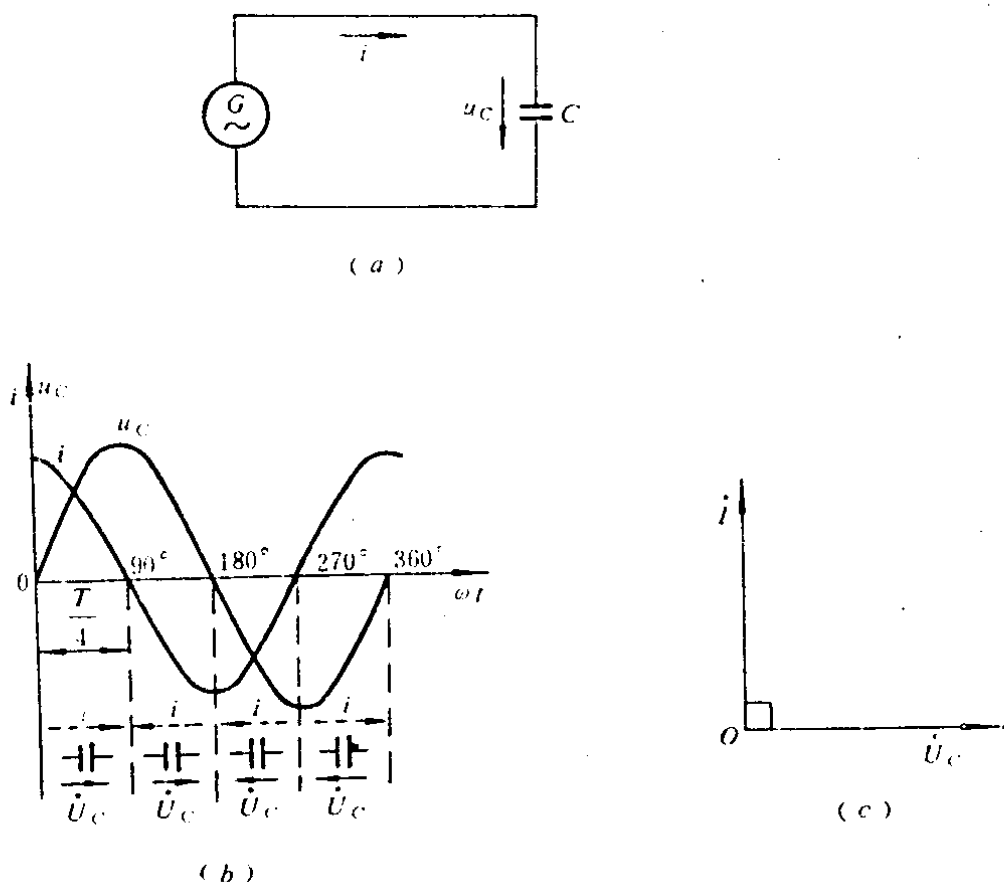


图 1-3 电容电路图

(a) 电路图；(b) 波形图；(c) 相量图

电势的方向和电流的方向相反，力图阻止电流的增加；当电流减少时，它的方向和电流的方向相同，又力图阻止电流的减少。这样，就使负荷两端的电压和电流不能同时达到最大值，变得不同相，使电流落后（滞后）电压 90° 相位角，即电压达到最大值后需隔四分之一周期，电流才能达到最大值。因此，当电流的方向和电压的方向一致时，电源把电能输送给负荷转换成磁场能量储存起来；而当电流和电压的方向相反时，负荷所储存的磁场能量便转换为电能送还给电源。就这样，能量在不断地交换着，一个周期内电源将能量送出两次，收回两次，能量并没有消耗掉，所以感性负荷又叫做无

功负荷，其交换的功率叫做无功功率。

(3) 电容性负荷（如电容器）具有和电感性负荷相似的性质。它也是一种能够储存和释放出能量的负荷，即是一种能与电源进行能量交换而不消耗能量的负荷。它的电流和电压的相位也是相差 90° 角，但不同的是这种负荷的电流超前电压 90° 相位角。因此，它储存和放出能量的时间正好和电感性负荷相反，即电感性负荷储存能量的时候，恰好是电容性负荷放出能量的时候，而电感性负荷放出能量的时候，恰好是电容性负荷储存能量之时。同时在一个周期中，能量也是送出两次，收回两次，能量仅被用来进行交换而没被负荷消耗掉，所以电容性负荷也是一种无功负荷。

通过以上分析可知：

(1) 电力网在运行时，电源供给的无功功率，是用来在电气设备中建立和维持磁场，进行能量交换的，它为能量的输送、转换创造了必需的条件。没有它，变压器就不能变压与输送电能；没有它，电动机的旋转磁场就建立不起来，电动机也就不能旋转。因此，无功并非“无用”之功，而是和有功一样同等重要。

(2) 由于无功电力不直接作实际消耗之功，它仅完成电磁能量的相互转换，反映出交流电路中电感、电容和电源间进行能量交换的规模，因而也就不需要消耗燃料和水能，从这个意义讲，可称之为“无功电力”，但这也是相对于“有功电力”而言的。

(3) 一般称电感性负荷是无功功率的消耗者，电容性负荷是无功功率的生产者。在电力网中由于电感性负荷与电容性负荷吸收和释放能量的时间正好相反，因此，当电感性负荷吸收能量时，电容性负荷放出能量，帮助电源提供能量。

所以在电力系统中除了发电机发出一定的无功功率外，电容性负荷也是一种无功能源。

(4) 无功功率和有功功率是密切相关的，输送有功电力时需要消耗无功功率，输送无功电力时需要消耗有功功率。无功电力和有功电力都是通过电流传输的，导体里通过的电流既包括无功成分，也包括有功成分。这个电流通过导体的电阻和电抗时，就会造成有功功率损耗和无功功率损耗，还会造成电压降落，直接影响电力网的安全经济运行。

下面介绍无功功率的计算方法。

在单相交流电路里，一个周期内功率的平均值 $P = UI\cos\varphi$ ， U 是电压的有效值， I 是电流的有效值， φ 是电压和电流间的相位角， $\cos\varphi$ 是功率因数。有功功率的单位是瓦 (W)、千瓦 (kW) 或兆瓦 (MW)；无功功率 $Q = UI\sin\varphi$ ， $\sin\varphi$ 是电压和电流间相位角的正弦值。无功功率的单位是乏 (var)、千乏 (kvar) 或兆乏 (Mvar)。在一般交流电路里，输送的电功率是有功成分和无功成分的合成量，叫做视在功率，用符号 S 表示， $S = UI$ ，它的单位是伏安 (VA)、千伏安 (kVA) 或兆伏安 (MVA)。

在三相交流电路里，三相功率的计算公式为：

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

$$P = \sqrt{3} UI\cos\varphi \quad (1-2)$$

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

S 、 P 、 Q 三者的关系如图 1-4 所示。

所以上述三式又可表示为：

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

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

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

二、无功电力与电压

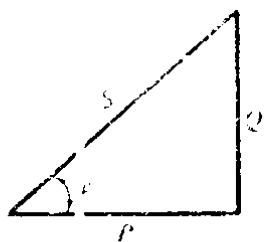


图 1-4 功率三角形

电压是电能质量的主要指标之一。电压质量对电力网稳定运行，降低线路损耗，保证工农业生产安全，提高产品质量，降低用电单耗等都有直接影响。因此保证电压质量，即保证端电压的偏移和波动都在规定的范围内，是电力网运行中的主要任务之一。

1. 无功电力是影响电压质量的一个主要因素

从电压损耗的公式 $\Delta U = (PR + QX) / U$ 可见，在电力网结构 (R 、 X) 确定的情况下，电压损耗与输送的有功功率及无功功率有关。而在输送有功功率一定的情况下，电压损耗主要取决于输送的无功功率的数值。

当电力网有能力向负荷供给足够的无功功率时，负荷的电压就能够维持在正常的水平上。如果无功电源容量不足，负荷的端电压就会降低。维持电力网的电压水平，与无功功率的平衡之间存在着不可分割的关系。图1-5 表示电力网内综合负荷的无功功率与电压的关系。

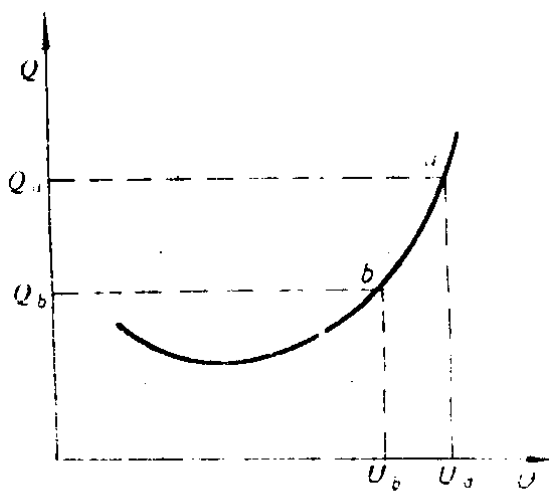


图 1-5 无功功率与电压的关系图

由图1-5可见，要保持在电压 U_0 下运行就得供给相应的无功功率 Q_0 。当无功电源容量不足，只能供给无功功率 Q_1 时，电压被迫下降至 U_1 。为此要求电力网必须有足够的无功电源容量（包括应有的无功备用容量），否则应增加必要的无功补偿设备，以保持电力网的无功功率平衡。

2. 电力网电压波动的主要因素

造成电压波动的主要因素，一是用户无功负荷（如高峰负荷与低谷负荷）的变化，二是电力网内无功潮流的变化（如主要发电机组的开机与停机引起的无功潮流变化）。如果电力网中没有足够的无功补偿设备和调压装置，便会产生大的电压波动和偏移，甚至出现不允许的低电压或高电压运行状态。

如果大量的无功功率不能就地供应，靠长途输送，流经各级输变电设备的话，就会产生较大的无功功率损耗和电压降落，若无适当的调压手段，便会造成电网低电压运行。相反，当电力网具有充足的无功电源，用户所需的无功功率又大大减少时，输送中的无功功率损耗亦相应减少，用户端电压便会显著上升，甚至出现电网高电压运行。可见，当电压的变动幅度明显地超过规定的容许范围时，将会影响电力网的安全经济运行。

3. 低电压和高电压运行的危害性

（1）低电压运行的危害性：

- 1）降低发电厂的出力，减少输变电设备的送电能力；
- 2）增加电力网的功率损耗和电能损耗；
- 3）危及电力网的安全运行，严重时导致电压崩溃，系统瓦解；