

DIANQI SHEBEI JI YUNXING WEIHU XILIE
WUGONG BUCHANG FENCE

电气设备及运行维护系列 无功补偿分册

张全元 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANQI SHEBEI JI YUNXING WEIHU XILIE
WUGONG BUCHANG FENCE

电气设备及运行维护系列 无功补偿分册

张全元 编著



内 容 提 要

《电气设备及其运行维护系列丛书》主要从基础知识、原理、结构、相关标准要求及运行维护等方面对电气设备进行全面的介绍。本丛书内容是编者多年现场工作的经验与总结，实用性强。

本书为无功补偿分册，共分五章，分别介绍了无功补偿基本概念、输电线路并联电抗器补偿，输电线路串联电容器补偿，3~220kV 变电站并联电容器补偿，超高压变电站无功补偿。

本书可作为电力系统现场运行维护人员及技术管理人员的培训、自学用书，还可作为电力工作者及大专院校相关专业的阅读参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气设备及其运行维护系列. 无功补偿分册/张全元编著. —北京: 中国电力出版社, 2015.9

ISBN 978-7-5123-7695-3

I. ①电… II. ①张… III. ①电气设备-维修②无功补偿器-维修 IV. ①TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 095245 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 9 月第一版 2015 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.25 印张 342 千字 1 插页

印数 0001—2000 册 定价 52.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

编 委 会

编 著	张全元	李广渊		
主 审	李洪波	温先卫	赵连政	
编写人员	王永清	陈元建	何彦平	刘光毅
	刘克岐	杨爱民	陶 爽	周贤伟
	余洁淑	张希成	付连杰	周杰茹

前 言

自 1981 年 1 月参加工作到本书的出版,作者已在电力系统从事变电运行维护及培训工作 33 年。其中近 20 年的业余时间从事与变电运行、变电站设备技术、事故处理及仿真培训有关的专业书籍的编写工作,并先后出版了《变电运行现场技术问答》《变电站现场事故处理及典型案例分析》等十本专著,这些专著的成稿是在工作中不断地总结,在总结中不断地深化,在深化中不断地探索,在探索中不断地提高。随着作者知识面的不断深入和拓展,萌发了编写电气设备系列丛书的梦想,经过与同行和出版社编辑的多次探讨,决定编写这套系列丛书。

本套系列丛书站在现场运行维护人员的角度,从设备的基础知识、原理、结构、标准规定、运行维护等进行全面介绍。无功补偿分册是本套书的第二册。

全书共五章,第一章是无功补偿基本概念,第二章是输电线路并联电抗器补偿,第三章是输电线路串联电容器补偿,第四章是 3~220kV 变电站并联电容器补偿,第五章是超高压变电站无功补偿。

全书由国网湖北省电力公司检修公司张全元,国网冀北电力有限公司检修分公司李广渊编著,由国网黑龙江省电力有限公司技能培训中心齐齐哈尔分部李洪波、国网湖北省电力公司检修公司温先卫、国网冀北电力有限公司培训中心赵连政审核。

在编写本书时,参考了大量的相关书籍,在此对原作者表示衷心的感谢。对为本书再版提供资料及提出宝贵意见的读者和工程技术人员表示衷心的感谢。

由于经验和理论水平所限,书中难免出现错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 6 月

目 录

前言

第一章 无功补偿基本概念	1
第一节 无功功率的基本概念.....	1
第二节 无功补偿的原则及补偿方式.....	7
第三节 无功补偿的容量选择.....	10
第四节 无功功率的平衡.....	12
第五节 提高功率因数的意义.....	13
第二章 输电线路并联电抗器补偿	14
第一节 工频过电压的基本概念.....	14
第二节 超高压空载长线路电容效应.....	14
第三节 并联电抗器及中性点电抗器的作用.....	18
第四节 并联电抗器的安装原则和接入方式.....	23
第五节 并联电抗器的分类及技术参数.....	24
第六节 大型并联电抗器的特点、抗值及无功功率与电压的关系.....	33
第七节 并联电抗器的结构.....	35
第八节 抽能电抗器.....	54
第九节 并联电抗器的运行.....	54
第十节 并联电抗器的检修.....	62
第十一节 并联电抗器的试验.....	69
第十二节 并联电抗器的异常及故障处理.....	71
第三章 输电线路串联电容器补偿	81
第一节 串联补偿装置的工作原理.....	81
第二节 输电线路串联补偿变电站.....	83
第三节 固定串联补偿装置的构成.....	84
第四节 可控串联电容器补偿装置的晶闸管阀和冷却系统.....	90
第五节 串联补偿装置的典型保护.....	92
第六节 串联补偿装置保护对于线路保护的影响.....	97
第七节 串联电容器补偿装置运行维护.....	100
第八节 串联补偿电容器装置一次设备试验.....	114
第九节 串联补偿电容器装置异常运行.....	118

第十节	次同步谐振问题及其解决方案	119
第四章	3~220kV 变电站并联电容器补偿	122
第一节	电容器的基本概念	122
第二节	并联电容器的接入及接线方式	122
第三节	并联电容器的分类及技术参数	126
第四节	并联电容器的结构	140
第五节	并联电容器组配套设备	150
第六节	并联电容器保护	173
第七节	谐波对无功补偿装置的影响及串联电抗器抑制措施	179
第八节	高频涌流及其限制	182
第九节	投切并联电容器的操作过电压	185
第十节	无功补偿装置的运行与维护	190
第五章	超高压变电站无功补偿	211
第一节	超高压变电站无功补偿的作用	211
第二节	超高压变电站无功补偿装置接线	211
第三节	超高压变电站无功补偿装置保护配置	213
第四节	超高压变电站无功补偿的基本结构	215
参考文献		217

无功补偿基本概念

电力系统中，由于无功功率不足，会使系统电压及功率因数降低，从而损坏用电设备，严重时会造成电压崩溃，使系统瓦解，造成大面积停电。另外，功率因数和电压的降低，还会使电气设备得不到充分利用，造成电能损耗增加，效率降低，从而限制了线路的送电能力，影响电网的安全运行及用户的正常用电。

第一节 无功功率的基本概念

一、无功功率

1. 有功功率

有功功率指交流电瞬时功率在一个周期内的平均值，又称平均功率，用字母 P 表示，单位为千瓦 (kW)。有功功率在电路中指电阻部分所消耗的功率，对电动机来说指它的出力。

如图 1-1 所示，对于纯电阻电路设电源电压 $U = U_m \sin \omega t$ ，则回路中的电流、功率分别为

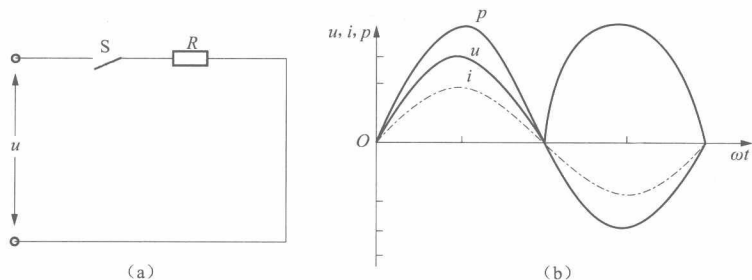


图 1-1 纯电阻电路
(a) 电路图；(b) 波形图

$$I = U/R = (U_m/R) \sin \omega t \quad (1-1)$$

$$\begin{aligned} P &= UI = U_m \sin \omega t \cdot \left(\frac{U_m}{R}\right) \sin \omega t \quad (1-2) \\ &= U_m I_m \sin^2 \omega t \\ &= UI - UI \cos 2\omega t \end{aligned}$$

式中 U 、 I 、 R ——电路中的电压、电流、电阻量纲；

U_m 、 I_m ——电压、电流的最大值。

可以看出，电压和电流相位相同，且功率始终为一个正值。由于电流和电压同相位，此功率一直由电源提供。

2. 无功功率

无功功率指在具有电感（或电容）的电路里，电感（或电容）在半周期的时间里把电源的能量变成磁场（或电场）的能量储存起来，在另外半个周期的时间内又把储存的磁场（或电场）能量送还给电源。它们只是与电源进行能量交换，并没有真正消耗能量。把与电源交换能量的速率的振幅值称为无功功率，用字母 Q 表示，单位为乏（var）。其物理概念为：如图 1-2 所示，对于一个纯电感 L 电路，当 S 闭合后，流过回路的是一个电感电流，若回路加上的电压为 $U=U_m \sin \omega t$ ，则

$$I = I_m \cos \omega t \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} P &= UI = U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t \\ &= UI \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (1-4)$$

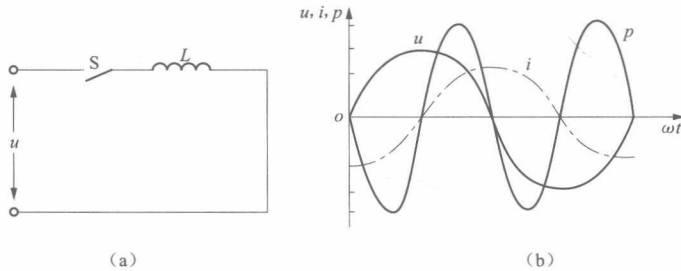


图 1-2 纯电感电路
(a) 电路图；(b) 波形图

由此可见，电感功率是以两倍频率在正负周期内正弦变化的。发电机产生感应（磁场）能量，在电路中以感应（磁场）能量的形式积蓄，在一定的时间区域里，电路把能量回送给发电机。在一个周期的时间内，电能（功率）在发电机和电路之间进行两次交换，但其平均值为零，没有损耗。所以对电感而言，在交流电压作用下，并不发生有功功率消耗，只发生电源和电感中能量之间的交换，并不消耗能量，这种交换功率叫做无功功率。

3. 无功功率作用

无功功率用来在电路的电感、电容元件中建立变化的电磁场，从而建立电压，传递和转换有功功率，成为电力系统和用电设备（纯电阻设备外）正常运转所不可缺少的因素之一。电磁场系统的能量传输速度与光速相同，达 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ；导体中自由电子的移动速度与音速相同，为 300 m/s 。从以上事实可以看出，通过导体交换的电力系统的能量，是以频率倍数为周期、在 LC 电路作为无功功率被储存，此能量从电源被传输至负荷，在传输过程中消耗有功功率。

二、无功电源

目前电网中运行的主要无功电源包括动态和静态的无功电源。

1. 动态无功电源

(1) 同步发电机。同步发电机为电力系统主要的无功电源之一，既是有功功率电源，又是无功功率电源。不同系统条件和不同安装位置对发电机的运行功率因数要求不同，位于负荷中心附近的发电机组，有较大地送出无功功率的能力，除了可以供应正常负荷的部分无功功率需求外，由于其对系统电压影响大、反应快，还可以作为电网事故情况的紧急无功功率储备。受发电机功率因数的影响，发电机在有功功率达到额定出力时，无功功率只能达到有功功率的50%~75%。随着电力系统大机组、远距离、超高压送电比重的逐步增大，发电机无功容量的利用率进一步降低，因此，电网需相应提高无功补偿度，来保证系统无功功率的平衡。

(2) 同步电动机。同步电动机或同步运行的异步电动机也属于无功电源。同步电动机消耗的无功功率取决于转子中励磁电流的大小。在欠励状态时，定子绕组向电网“吸取”无功功率；在过励状态时，定子绕组向电网“送出”无功功率。因此，只要调节电动机的励磁电流，使其处于过励状态，就可以使同步电动机向电网“送出”无功功率。异步电动机同步运行就是将异步电动机三相转子绕组适当连接并通入直流励磁电流，使其呈同步电动机运行状态，达到“异步电动机同步化”。因此只要调节电动机的直流励磁电流，使其呈过励状态，即能向电网输出无功功率。

(3) 静止无功补偿器 (SVC)。静止无功补偿器 (Stalic Var Compensators, SVC) 是近年来国内新发展起来的一种无功补偿与电压调节设备，但国外已应用很久。其特点是调节迅速、运行维护量小、可靠性高、可提供可变动的容性和感性无功电源。SVC 由电容器和可调节电抗器并联组成，采用晶闸管或电抗器饱和特性控制，对冲击性负荷特别适宜。在实际运行中有许多不同型式的静止无功补偿器，其特性差别很大，主要包括晶闸管控制电抗器 (TCR)、晶闸管投切电容器 (TSC) 和饱和电抗器 (SR)，TCR 和 SR 补偿器通常与电容器组一起使用。由于静止无功补偿器快速响应的特点，主要应用于配电网中以抑制冲击性负荷，如轧钢机、电弧炉、电焊机等引起的电压闪变。

(4) 静止同步补偿器 (STATCOM)。STATCOM 是一种并联型无功补偿装置，能够发出或吸收无功功率且不需要大量外部的电抗器或电容器组。一般 STATCOM 是一种固态开关变流器，当其输入端接有电源或储能装置时，输出端可独立发出或吸收可控的有功和无功功率。STATCOM 也可比作一台理想的同步电动机，能够产生一组平衡的、阻值和相角可控的主相正弦基频电压，可发出容性或感性无功功率。STATCOM 可在输电和配电系统中进行动态电压控制，对输电系统中的功率振荡产生阻尼作用，提高系统的暂态稳定性。

(5) 低压无功动态功率补偿技术。由于城市公用配网接待的主要为居民和商业用户，具有负荷变化大、功率因数低的特点，为提高城市居民用电的电能质量，降低中低压网电能损耗，有效的措施是在城市公用变压器台或箱式变电站安装使用晶闸管控制的低压无功动态补偿装置。低压无功动态补偿装置主要由自愈式金属膜电容器、交流接触器、晶闸管及控制器等组成，控制器具有过零点检测，过零点触发，无分、合浪涌电流冲击的功能。选用晶闸管无触点开关电路进行自动投切，可避免交流接触器在投的过程中因涌流大、触点产生火花，造成接触器触头烧毁。同时为减少晶闸管功耗发热，在投切完成后可通过与其并联的交流接触器来维持电容器的正常运行。目前，针对城市低压配电网中三相电流不平衡严重的情况，晶闸管控制的低压无功动态补偿装置可实现由三相共补到分相补偿，避免了三相共补中存在

的某一相（采样信号相）能合理补偿，其他两相过补偿或欠补偿的缺陷。

2. 静态无功电源

(1) 并联电容器。由于电网元件的阻抗和用电负荷主要为感性，因此，其所需的感性无功功率主要应由容件无功功率进行补偿，并联电容器成为补偿电力系统无功需求的主要无功电源。并联电容器最大的优点是价格便宜、易于安装，缺点是其输出无功容量随安装处时线电压的降低而呈平方倍地下降。

(2) 高压并联电抗器。并联电抗器在电力系统中广泛用于限制工频过电压、消除发电机自励磁、限制操作过电压和线路容性充电功率等。并联电抗器常用来补偿线路电容，特别是用来限制由于线路开路或轻载引起的电压升高。长距离线路中，限制线路充电时末端电压上升过高、限制用负荷造成的过电压以及避免发电机自励磁产生过电压方面，高压电抗器都起着主要作用。另外，装设并联电抗器也有利于电网分层的无功功率平衡及电压稳定。

(3) 低压并联电抗器。主要并联于 330kV 及以上电压等级变电站低压侧，用于吸收系统容性无功功率，并通过调整并联电抗器的数量来达到吸收系统多余无功、调整运行电压的目的。

(4) 串联电容器。串联电容器提供了控制电网纵向特性手段，同时提供了无功功率，这种补偿形式在某些情况是十分有效的。串联电容器可减小输电线路电抗，通常是采用串补的主要原因，它提高了电力系统的稳定性，并有助于控制线路的电压降。因为串联电容器是无源的，无需外部控制或调度员操作就可以发挥作用。

(5) 输电线路充电功率。高压及超高压架空输电线路以及电缆线路的充电功率为无功电源。电网运行中输电线路既是无功负荷也是无功电源。其产生的无功功率与运行电压的平方成正比，其消耗的无功功率与其导线通过的电流平方成正比。输电线路的等值电路如图 1-3 所示。

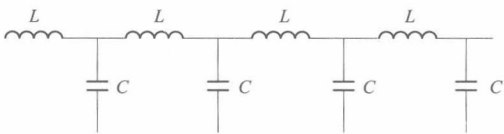


图 1-3 输电线路的等值电路图

源。电网运行中输电线路既是无功负荷也是无功电源。其产生的无功功率与运行电压的平方成正比，其消耗的无功功率与其导线通过的电流平方成正比。输电线路的等值电路如图 1-3 所示。

输电线路充电功率

$$Q_L = U^2 B$$

$$B = \omega C \tag{1-5}$$

式中 ω ——系统角频率， $\omega = 2\pi f$ ， $f = 50\text{Hz}$ ；

C ——线路电容，F；

Q_L ——输电线路充电功率，Mvar；

U ——运行电压，kV；

B ——线路并联电纳，S。

输电线路并联电容或称充电电容发出的无功功率正比于电压的平方。由于线路的运行电压偏差在一定范围内，因此输电线路发出的无功功率基本恒定。输电线路充电电容发出的无功功率见表 1-1。

表 1-1 输电线路充电电容发出的无功功率

电压等级 (kV)	110	220		330	500		750
导线型式	单根	单根	双分裂	双分裂	三分裂	四分裂	四分裂
无功功率 (Mvar/km)	0.034	0.14	0.19	0.41	1.03	1.18	2.4

35kV 及以上电缆线路充电功率见表 1-2。

表 1-2 35kV 及以上电缆线路充电功率

充电功率 (Mvar/km) 电压等级 (kV) 截面面积 (mm ²)	35	110	220	330	500
	100	—	1.07	—	—
180	—	1.2	—	—	—
270	—	1.23	3.25	6.5	—
400	0.09	1.26	3.57	7.2	—
600	0.1	1.52	3.9	7.77	—
680	—	1.58	4.05	8.0	17.3
920	0.12	1.75	4.45	8.74	—

三、无功负荷

无功功率需求包括相位超前运转的发电机、输电线的电感、变压器的电感、相位滞后的调相设备（进行相位滞后运转的同步调相机）、用户的相位滞后负荷。无功负荷为电网中不做功部分，各种交流电动机在消耗有功功率的同时也吸收无功功率。以下介绍电网中主要的几种无功负荷。

(1) 异步电动机。异步电动机是电网中主要的感性无功负荷。

(2) 变压器。变压器也是电网中主要无功负荷，它消耗的无功功率包括空载励无功功率和负荷电流通过漏抗产生的无功损耗两部分。变压器总无功功率损耗约占变压器额定容量的 10%~20%。另外，变压器无功功率损耗在空载或轻载运行时主要受励磁电流影响，在重载运行时主要负荷电流和漏抗的影响。

(3) 输电线路。因输电线路不仅包括分布电阻和分布电容，还包括分布电抗，当线路通过传输功率时，分布电抗也需要吸收无功功率。线路的无功损耗与输送的有功功率成正比，输送有功功率越大，无功损耗越大。

输电线路串联电抗上的无功损耗为

$$Q_s = I^2 X = (P^2 + Q^2)X/U^2 \quad (1-6)$$

式中 Q_s ——线路串联电抗无功损耗，Mvar；

I ——线路流过的电流，kA；

X ——输电线路串联电抗， Ω ；

P ——线路传输的有功功率，kW；

Q ——线路传输的无功功率，kvar；

U ——运行电压，kV。

输电线路的串联电感消耗的无功功率正比于电流的平方，当电流值在重载和轻载之间变化时，输电线路的无功损耗也相同变化。因此输电线路的净无功功率将随着负荷水平不断改变，且输电线路发出无功功率 $U^2 B$ （相对恒定）；输电线路消耗无功功率为 $I^2 X$ （变化）。其中， $B(\omega C)$ 为线路并联电纳， $X(\omega L)$ 为线路串联电抗。

四、无功功率传输

在电网的受端或负荷端发生系统电压严重降低或崩溃的紧急状况下，输电线路或变压器

的无功功率传输能力及无功电源事故储备对维持系统安全运行至关重要。与有功功率不同，影响无功功率潮流分布的主要因素为网络阻抗、变压器分接头和节点电压。无功功率传输大小主要取决于电压幅值，传输方向为由电压高的一端流向电压低的一端。

(1) 线路的自然功率（波阻抗功率）。

当线路发出的无功功率恰好等于其消耗的无功功率时的传输功率称为线路的自然功率或波阻抗功率。设单位长度线路的电抗为 x 电纳为 b ，令 $U^2 b = I^2 x$ ，可得线路的波阻抗或称为特征阻抗，即

$$Z_0 = U/I = \sqrt{x/b} \quad (1-7)$$

自然功率或波阻抗功率为

$$P_0 = U^2/Z_0$$

从多方面而言，波阻抗功率对应于输电线路的理想负荷状况。不仅线路发出的无功功率等于线路消耗的无功功率，且沿线路各点电压和电流的幅值大小相同。其中，沿线路各点电压幅值恒定，此外，沿线路各点电压与电流的相位也相同。

(2) 线路无功功率传输。

在运行中发现，一些输电线路在大功率潮流传输过程中，虽然在线路送端注入了大量的无功功率，但在受端却没有任何无功功率流出，且受端无功功率为负值。这表明从受端向线路注入了一定量的无功功率，当无功功率为负值时，输电线路对受端系统实际等于一个无功负荷，输电线路是系统消耗无功功率的元件，线路的无功损耗等于送端和受端注入的无功功率之和。因此，输电线路在重载情况下无功功率消耗将大大增加，为保证该节点应有的电压水平，线路两端需要增加更大的无功电源。

架空线路产生或吸收无功功率取决于其传输电流的大小。当传输功率低于自然功率（波阻抗功率）时，线路产生无功功率；当传输功率高于自然功率（波阻抗功率）时，线路吸收无功功率。电缆由于对地电容较大，具有较高的自然功率，又由于通常在低于自然功率的状态运行，因而总在产生无功功率。

(3) 原因。

减小线路无功功率传输的第一个原因是无功功率传输存在难度，表现在如果线路两端电压相角差较大，则即使两端电压幅值差值再大，也不可能通过该线路传输无功功率。长线路或重载情况都可能导致两端电压相角差增大。根据电力系统运行要求，各点电压幅值应维持在 $(1 \pm 10\%)$ 额定电压的范围内，这增加了无功功率传输的难度。因此相对于有功功率传输，无功功率不能长距离传输。

减小线路无功功率传输的第二个原因是为减小线路的有功和无功损耗。为保证电力系统运行的经济性，输电线路的有功损耗应降至最低；同样，为减少并联电容器等无功补偿设备的投资，输电线路的无功损耗也应降至最低。电网运行中无功损耗占无功负荷的 $30\% \sim 50\%$ ，无功电源和负荷要就地平衡，不应长距离输送，尽可能减少电网有功损耗。输电线路上的有功和无功损耗分别为 P_s 和 Q_s ，即

$$P_s = I^2 R = (P^2 + Q^2)R/U^2 \quad (1-8)$$

$$Q_s = I^2 X = (P^2 + Q^2)X/U^2 \quad (1-9)$$

由式 (1-8) 和式 (1-9) 可知，为使线路的功率损耗最小，必须使线路传输的无功功率最小，同时还应保持高的电压水平。

减小线路无功功率传输的第三个原因是为减小由于甩负荷引起的线路短时过电压，其中最严重的情况是长线路负荷侧断路器突然跳闸，线路通过送端仍闭合的断路器使其处于带电状态，电压异常升高，易损坏电气设备绝缘。

第二节 无功补偿的原则及补偿方式

通常电网需要的无功功率比有功功率大得多，若综合发电最高负荷为 100%，则无功功率总需要量约为 120%~140%。但发电机的额定功率因数一般大于 0.8，负荷功率因数一般小于 0.8，因此单靠发电机的无功出力不能平衡自然负荷所需的无功功率，由于不选择长距离输送无功功率，因此，产生了无功补偿的问题。

无功补偿指为满足电力网和负荷端电压水平及经济运行的要求必须在电力网和负荷端设置无功电源，电容器、调相机等。

在初期的交流电网中，因为发电厂靠近负荷中心，并不需要专门的无功补偿设备。随着电网的不断发展，为改善负荷的功率因数，逐步采用了同步电动机、小型同步调相机和并联电容器。虽然无功功率基本上不消耗能源，但无功功率传送却要引起有功功率损耗和电压波动，合理地配置无功功率补偿容量，优化电力网的无功潮流分布，可以减少网络中的有功功率损耗和电压波动并改善用户端的电压质量。由于电网元件的阻抗和用电负荷主要为感性的，因此其所需的感性无功功率主要应由容性无功功率进行补偿，而并联电容器由于其价格便宜且易于安装而成为补偿电力系统无功需求的主要无功电源，因此国内外 35~1000kV 变电站的无功补偿主要选择是并联电容器。

当并联电容器组接入点母线电压低于容许限度时，可通过投退并联电容器组进行调压。但多数情况下投入并联电容器组是为提高功率因数、降低电网损耗。

一、无功补偿的原则

1. 无功补偿配置的基本原则

无功电力平衡实行分层分区、就地平衡的原则。

(1) 电力系统配置的无功补偿装置应能保证在系统有功负荷高峰和负荷低谷运行方式下，分（电压）层和分（供电）区的无功平衡。分（电压）层无功平衡的重点是 220kV 及以上电压等级层面的无功平衡，分（供电）区就地平衡的重点是 110kV 及以下配电系统的无功平衡。无功补偿配置应根据电网情况，实施分散就地补偿与变电站集中补偿相结合，电网补偿与用户补偿相结合，高压补偿与低压补偿相结合，满足降损和调压的需要。

(2) 各级电网避免通过输电线路远距离输送无功电力，1000、750、500、330kV 电压等级系统与下一级系统间不应有大量的无功电力交换。1000、750、500、330kV 电压等级超高压输电线路的充电功率应按照就地补偿的原则采用高、低压并联电抗器基本予以补偿。

(3) 受端系统应有足够的无功备用容量。当受端系统存在电压稳定问题时，应通过技术经济比较，考虑在受端系统的枢纽变电站配置动态无功补偿装置。

(4) 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、类型的无功补偿装置。所装设的无功补偿装置应不会引起系统谐波明显放大，并应避免大量的无功电力穿越变压器。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 0.95。

(5) 对于大量采用 10~220kV 电缆线路的城市电网, 在新建 110kV 及以上电压等级的变电站时, 应根据电缆进、出线情况在相关变电站分散配置适当容量的感性无功补偿装置。

(6) 35kV 及以上电压等级的变电站, 主变压器高压侧应具备双向有功功率和无功功率(或功率因数)等运行参数的采集、测量功能。

(7) 为保证系统具有足够的事故备用无功容量和调压能力, 并入电网的发电机组应具备满负荷时功率因数在 0.85 (滞相) ~0.97 (进相) 运行的能力, 新建机组应满足进相功率因数为 0.95 运行的能力。为了平衡 750(500、330) kV 电压等级输电线路的充电功率, 在电厂侧可以安装一定容量的并联电抗器。

(8) 电力用户应根据其负荷性质采用适当的无功补偿方式和容量, 在任何情况下, 不应向电网反送无功电力, 并保证在电网负荷高峰时不从电网吸收无功电力。

(9) 并联电容器组和并联电抗器组宜采用自动投切方式。

2. 330、500、750、1000kV 变电站的无功补偿

(1) 330、500、750、1000kV 电压等级与下一级电网之间不宜有无功电力交换, 330、500、750kV 电压等级输电线路的充电功率应按就地补偿的原则采用高、低压并联电抗器予以补偿。

(2) 变电站内装设的感性和容性无功补偿设备的容量和型式, 应根据电力系统近、远期调相调压计算结果综合考虑后确定。

(3) 330、500、750、1000kV 变电站容性无功补偿容量应考虑补偿主变压器无功损耗及输电线路输送容量较大时电网的无功缺额, 可按主变压器容量的 10%~20% 配置或经计算确定。

(4) 无功补偿装置应优先采用投资省、损耗小、可分组投切的并联电容器和并联电抗器。为满足系统稳定和电能质量要求需装设静止无功补偿装置时, 应通过技术经济综合比较后确定。

(5) 并联电容器组和低压并联电抗器组的补偿容量, 宜分别为主变压器容量的 30% 以下。无功补偿装置宜根据无功负荷增长和电网结构变化分期装设。

(6) 并联电容器组和低压并联电抗器组的分组容量, 应满足下列要求:

1) 分组装置在不同组合方式下投切时, 不得引起高次谐波谐振和有危害谐波放大。

2) 投切一组补偿设备引起所在母线的电压变动值, 不宜超过其额定电压的 2.5%。

3) 应与断路器投切电容器组的能力相适应。

(7) 根据电容器组合闸涌流、系统谐波情况及对系统和电容器组的影响等方面的验算确定分组投切的并联电容器组的电抗率。当变电站无谐波实测值时, 可按 GB/T14549—1993《电能质量公用电网谐波》中规定的各级电压母线的谐波电压畸变率及谐波电流允许值计算。当谐波为 5 次及以上时, 电抗率宜取 4.5%~5%; 当谐波为 3 次及以上时, 电抗率宜取 12%, 也可采用 4.5%~5% 与 12% 两种电抗率混装方式。

(8) 静止无功补偿装置的型式应通过技术经济比较确定, 可采用的主要类型包括: 晶闸管控制电抗器 (TCR) 型、晶闸管投切电容器 (TSC) 型、晶闸管投切电抗器 (TSR) 型。实际中宜采用晶闸管控制电抗器配合断路器投切的电容器组和电抗器组, 晶闸管控制电抗器的容量可按不小于电容器组两者中的最大分组容量选择。

(9) 330、500、750、1000kV 变电站安装有 2 台及以上变压器时, 每台变压器配置的无功补偿容量应互相协调、匹配。

3. 220kV 变电站的无功补偿

(1) 220kV 变电站的容性无功补偿以补偿主变压器无功损耗为主, 并适当补偿部分线路的无功损耗。补偿容量按照主变压器容量的 10%~25% 配置, 并满足 220kV 主变压器最大负荷时, 其高压侧功率因数不低于 0.95 的要求。

(2) 当 220kV 变电站无功补偿装置所接入母线有直配负荷时, 容性无功补偿容量可按上限配置; 当无功补偿装置所接入母线无直配负荷或变压器各侧出线以电缆为主时, 容性无功补偿容量可按下限配置。

(3) 对进、出线以电缆为主的 220kV 变电站, 可根据电缆长度配置相应的感性无功补偿装置。每一台变压器的感性无功补偿装置容量不宜大于主变压器容量的 20%, 或经技术经济比较后确定。

(4) 220kV 变电站无功补偿装置的分组容量选择, 应通过计算确定, 最大单组无功补偿装置投切引起所在母线电压变化不宜超过电压额定值的 2.5%。一般情况下无功补偿装置的单组容量, 接入 66kV 电压等级时不宜大于 20Mvar, 接入 35kV 电压等级时不宜大于 12Mvar, 接入 10kV 电压等级时不宜大于 8Mvar。

(5) 220kV 变电站安装有两台及以上变压器时, 每台变压器配置的无功补偿容量宜基本一致。

4. 35~110kV 变电站的无功补偿

(1) 35~110kV 变电站的容性无功补偿装置以补偿变压器无功损耗为主, 并适当兼顾负荷侧的无功补偿。容性无功补偿装置的容量按主变压器容量的 10%~30% 配置, 并满足 35~110kV 主变压器最大负荷时, 其高压侧功率因数不低于 0.95 的要求。

(2) 110kV 变电站的单台主变压器容量为 40MVA 及以上时, 每台主变压器应配置不少于两组的容性无功补偿装置。

(3) 110kV 变电站无功补偿装置的单组容量不宜大于 6Mvar, 35kV 变电站无功补偿装置的单组容量不宜大于 3Mvar, 单组容量的选择还应考虑变电站负荷较小时无功补偿的需要。

(4) 新建 110kV 变电站时, 应根据电缆进、出线情况配置适当容量的感性无功补偿装置。

5. 10kV 及其他电压等级配电网的无功补偿

(1) 配电网的无功补偿以配电变压器低压侧集中补偿为主, 高压补偿为辅。配电变压器的无功补偿装置容量可按变压器最大负载率为 75%, 负荷自然功率因数为 0.85 考虑, 补偿到变压器最大负荷时其高压侧功率因数不低于 0.95 的要求, 或按照变压器容量的 20%~40% 进行配置。

(2) 配电变压器的电容器组应装设以电压为约束条件, 根据无功功率 (或无功电流) 进行分组自动投切的控制装置。

6. 电力用户的无功补偿

电力用户应根据其负荷特点, 合理配置无功补偿装置, 并达到 100kVA 及以上高压供电的电力用户, 功率因数不宜低于 0.90 的要求。

二、无功补偿方式

无功补偿方式为集中与分散补偿结合。集中补偿指在变电站集中补偿无功功率, 以补偿主变压器及前一段线路的无功损耗及部分无功负荷。变电站集中补偿主要补偿变压器本身的

无功损耗，以减少变压器以前线路上流过的无功功率；而负荷处就地补偿可降低用电设备至电源间所有发电、变电、配电设备上的无功损耗。在接近负荷分散补偿可减少无功功率的输送，以此来降低损耗、减少压降，取得较好的经济效益。对负荷集中在末端的配电线路应由用户进行补偿。当负荷沿线路分布时，如装设一组电容器应装在距送电端 1/3 线路长度处；如装设两组，可装在 2/5 及 4/5 线路长度处；也可通过计算确定使线损最小的装设点。

第三节 无功补偿的容量选择

目前国内变电站并联电容器组的无功容量选择主要按以下原则确定。

1. 330kV 及以上电压等级变电站的无功补偿

330kV 及以上电压等级变电站容性无功补偿的主要作用是补偿主变压器无功损耗及输电线路输送容量较大时电网的无功缺额。容性无功补偿容量应按照主变压器容量的 10%~20% 配置，或经过计算后确定。330kV 及以上电压等级变电站内配置的电容器单组容量最大值，在满足最大单组无功补偿装置投切引起所在母线电压变化不宜超过电压额定值的情况下，见表 1-3 确定。

表 1-3 330kV 及以上电压等级变电站内配置电容器单组容量最大值

电容器单组容量最大值 (Mvar)	补偿侧电压等级 (kV)	单组容量最大值		
		10	35	66
主变压器高压测等级 (kV)	330	10	28	
	500	60	60/80	
	750			120

注 500kV 变压器补偿侧电压为 66kV，主变压器容量为 750MVA 及以下时，配置的电容器单组最大值为 60Mvar；主变压器容量为 1000MVA 及以上时，配置的电容器单组最大值为 80Mvar。

330kV 及以上电压等级高压并联电抗器（包括中性点小电抗）的主要作用为限制工频过电压和降低潜供电流、恢复电压及平衡超高压输电线路的充电功率，高压并联电抗器的容量应根据上述要求确定。主变压器低压侧并联电抗器组的作用主要是补偿超高压输电线路的剩余充电功率，其容量应根据电网结构和运行的需要确定。局部地区 330kV 及以上电压等级短线路较多时，应根据无功就地平衡原则和电网结构特点，经计算分析，在适当地点装设母线高压并联电

抗器，进行无功补偿。以无功补偿为主的母线高压并联电抗器应装设断路器。330kV 及以上电压等级变电站安装有两台及以上变压器时，每台变压器配置的无功补偿容量应一致。

2. 220kV 变电站的无功补偿

220kV 变电站的容性无功补偿以补偿主变压器无功损耗为主，适当补偿部分线路及兼顾负荷侧的无功损耗。容性无功补偿容量应按下列情况选取，并满足在主变压器最大负荷时，其高压侧功率因数不低于 0.95。如果为 220kV 枢纽变电站，中压侧或低压侧出线带有电力用户负荷的 220kV 变电站，变比为 220kV/66 (35) kV 的双绕组变压器，220kV 高阻抗变压器其中一项时，容性无功补偿装置应按主变压器容量的 15%~25% 配置。如果为低压侧出线不带电力用户负荷的 220kV 终端站，统调发电厂并网点的 220kV 变电站，220kV 电压等级进出线以电缆为主的 220kV 变电站等其中一项时，容性无功补偿装置应按主变压器容量的 10%~15% 配置。