

无功补偿 岗位培训教材

丁毓山 徐义斌 主编

3-43



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

ALL THE

WORLD HAS



无功补偿 岗位培训教材

主 编 丁毓山 徐义斌
副 主 编 周国喻 金开宇
编写人员 张福华 徐义斌
 周国喻 金开宇
 林 敏 邢 焱
 王文涛 丁毓山



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共分十二章。主要包括：无功补偿的规划，无功补偿的意义和经济效益的分析，确定无功补偿容量的一般方法，电力电容器的结构、接线和安装，电力电容器的运行与维护，补偿电容器在运行中的异常现象，动态补偿器在电网中的应用，网络调压和无功补偿，电容器的控制与保护，无功补偿容量和安装位置的优化，各种优化法在网络补偿中的应用，以及无功补偿的等面积法则的程序设计等。

本书可作为电力行业、工矿企业无功补偿岗位及相关岗位的培训教材，也可供无功补偿装置设计、施工安装、运行、维护人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

无功补偿岗位培训教材/丁毓山, 徐义斌主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2002

ISBN 7-5084-1030-0

I. 无… II. ①丁…②徐… III. 无功补偿-技术培训-教材 IV. TM714.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 023580 号

书 名	无功补偿岗位培训教材
作 者	丁毓山 徐义斌 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) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 350 千字 1 插页
版 次	2002 年 6 月第一版 2002 年 6 月北京第一次印刷
印 数	0001—4100 册
定 价	34.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

无功补偿是电力系统安全稳定运行、降损节能的必要措施。在电力系统和电力企业中，无功补偿虽未设置专门的业务机构，但是从事无功补偿的专业人员确是很多的，几乎每个站、局都设有无功补偿专责人员，这些人员负责全局高低压电力网的无功补偿任务。该项任务备受各级领导的关切，因此每个省、市、县电业局、供电局、农电局把提高这些专责人员的业务水平作为自己的责任。编写这本《无功补偿岗位培训教训》的出发点则是协助无功补偿专责人员进一步熟悉无功补偿的业务，开拓无功补偿设备的选择、安装、运行等方面的知识领域。促进无功补偿专责人员更好地胜任无功补偿工作。

本书共分十二章，第一章为无功补偿的规划，第二章为无功补偿的意义和经济效益分析，由徐义斌同志编写；第三章为确定无功补偿容量的一般方法，由周国喻同志编写；第四章为电力电容器的结构、接线和安装，第五章为电力电容器的运行与维护，由张福华同志编写；第六章为补偿电容器在运行中的异常现象，由林敏同志编写；第七章为动态补偿在电网中的应用，由王文涛同志编写；第八章为网络调压和无功补偿，由邢焱同志编写；第九章为电容器的控制与保护，第十章为无功补偿容量和安装位置的优化，由金开宇同志编写；第十一章各种优化法在网络补偿中的应用，第十二章无功补偿等面积法则的程序设计，由丁毓山同志编写。本书前十章汇集了无功补偿岗位培训的必备知识，第十一章与第十二章可供从事无功补偿的专业研究人员参考。

值得申明的是，本书虽经反复推敲、多次修改，但是疏漏之处仍然难免，笔者在这里恳请有关专家和读者不吝赐教。

作 者

2002 年 2 月于沈阳

目 录

前言

第一章 无功补偿的规划	1
第一节 配电系统无功补偿规划的一般问题	1
第二节 配电网无功平衡	3
第三节 电力网供电区无功优化	10
第四节 低压就地和跟踪补偿分析	14
第五节 功率因数的测算和补偿方式的确定	19
第二章 无功补偿的意义和经济效益的分析	23
第一节 无功补偿的一般概念	23
第二节 功率因数调整电费	25
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	32
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	38
第三章 确定无功补偿容量的一般方法	42
第一节 确定补偿容量的几种方法	42
第二节 按无功经济当量确定补偿容量	48
第三节 低压网无功补偿的实用方法	50
第四节 关于变压器在无功补偿中有关参数的计算	55
第四章 电力电容器的结构、接线和安装	60
第一节 电力电容器的结构、接线及其分析	60
第二节 电力电容器的安装	69
第五章 电力电容器的运行与维护	73
第一节 电力电容器的故障	73
第二节 密集型电容器的运行与维护	79
第三节 电容器的安全运行	81
第四节 移相电容器的运行和维护	84
第五节 电容器使用中应注意的问题	86
第六章 补偿电容器在运行中的异常现象	92
第一节 补偿电容器引起异步电动机自激现象	92
第二节 电容器投入时发生的异常现象	94
第三节 限制电容器涌流的技术措施	98
第四节 过电压现象分析	101
第五节 并联电容器群爆现象分析	105
第七章 动态补偿器在电网中的应用	107
第一节 晶闸管整流电路	107
第二节 动态补偿器的工作原理	112

第三节	低压无功动态补偿装置的应用	114
第四节	低压无功补偿系列装置	118
第五节	动态补偿器在输电网中的应用	123
第八章	网络调压和无功补偿	128
第一节	合理调整运行电压	128
第二节	60kV 串联电容补偿装置设备选择	131
第九章	电容器的控制与保护	136
第一节	电容器接线与保护的设置	136
第二节	电容器自动投切的方式	143
第三节	无功负荷阶梯图的简化法	146
第四节	微机控制补偿装置	150
第五节	电容器的过流、过压保护	153
第六节	电容器的横差保护	153
第七节	电容器保护配置和整定计算	155
第八节	电容器的集成电路保护	157
第十章	无功补偿容量和安装位置的优化	162
第一节	黄金分割法优化与计算机监控配电网的补偿方案	162
第二节	按网损和年运行费最小确定补偿容量	164
第三节	按年支出费用最小和等网损微增率确定补偿容量	167
第四节	无功容量的合理分配	170
第五节	考虑负荷分布时补偿容量和补偿位置的优化	172
第六节	用相对分析法确定分均匀分布无功负荷的补偿容量	180
第七节	确定最佳补偿的 β 分布法	183
第八节	单端供电网无功补偿节电效益的程序设计	190
第十一章	各种优化法在网络补偿中的应用	194
第一节	无功补偿的动态优化	194
第二节	非线性规划法在网络补偿中的应用	199
第三节	牛顿法在网络补偿中的应用	204
第十二章	无功补偿的等面积法则的程序设计	209
第一节	线路长度和无功电流的折算	209
第二节	确定最佳容量和最佳位置的定理	212
第三节	等面积法则	218
第四节	补偿装置的经济分析	221
第五节	等面积法则的程序设计	224

第一章 无功补偿的规划

第一节 配电系统无功补偿规划的一般问题

一、规划的目的和要求

在电力系统中先天性地存在着大量的无功负荷，这些无功负荷来自电力线路、电力变压器以及用户的用电设备。系统运行中大量的无功功率，将降低系统的功率因数，增大线路电压损失和电能损失，严重的影响着电力企业的经济效益。解决这些问题的一个有效方法就是进行无功补偿。同时，在现代电力企业中，功率因数是考核配电网运行的重要指标，为达到考核指标，必须结合本地区的具体情况，进行无功补偿的规划，其规划的目的是：

- (1) 保证规划地区的无功平衡，维持电力系统的无功稳定。
- (2) 提高地区电网电压的质量，使地区电网无功、电压优化运行。
- (3) 提高功率因数，改善地区电网的电能质量和提高电力企业的经济效益。
- (4) 合理地确定无功补偿方式、无功补偿容量、无功补偿的安装地点使补偿效果最佳。
- (5) 防止过补偿引起发电机自励磁。

二、无功补偿设备

在配电网中无功补偿设备通常有下列几种：

- (1) 同步发电机。同步发电机是电力系统中惟一的有功电源，同时也是无功的基本源。
- (2) 同步电动机。同步电动机功率因数可以超前运行，在工、农业的生产中，凡是不要求调速的生产机械，诸如鼓风机、水泵等，在经济条件合适的情况下，应该尽量选用同步电动机拖动。
- (3) 异步电动机同步化。异步电动机同步化是指线绕式异步电动机，在启动至额定转速后，将转子用直流励磁，使其作为同步电动机使用，在这种运行方式下，异步电动机如同电容器一样，从电网吸收容性无功功率。
- (4) 电力电容器。在配电网中电力电容器是应用最为广泛的无功补偿设备，其原因是电力电容器是静止的无功补偿设备，因此其安装、运行、维护都比上述设备简单。
- (5) 晶闸管动态补偿器。晶闸管动态补偿器是近年来才发展起来的无功补偿装置，它以晶闸管为主要工作部件，由于其具有开关速度快、连续调节无功功率等优点，在配电网中、尤其是在低压配电网中应用的比较广泛。

三、无功补偿的容量、地点及补偿方式

在应用电容器进行无功补偿时，在电网中将要安装并联电容器。这些设备可抵偿感性负荷所消耗的部分无功功率，从而降低线路的电能损耗并提高系统的功率因数，改善电网的运行条件和电能质量。

在进行无功补偿配置时，实际上包含两个方面的内容：①补偿安装地点及补偿方式的

确定；②补偿容量的配置。

补偿装置的安装地点及方式可分为集中补偿、分组补偿、随机补偿、随器补偿、跟踪补偿等各种方式。

(1) 集中补偿通常指装设于地区变电所或高压供电用户降压变电所母线上的高压电容器组；也包括集中装设于电力用户总配电室低压母线上的电容器组。其优点是易于实现自动投切，利用率高，维护方便，事故少，能减少配电网、用户变压器及专供线路的无功负荷和电能损耗。

(2) 分组补偿一般装设于线路上、配变低压侧。

(3) 随机补偿是将低压电容器组与电动机并接，通过控制、保护装置与电机同时投切。

(4) 随器补偿是将低压电容器接在配电变压器二次侧，以补偿配电变压器空载无功。

(5) 跟踪补偿是指以无功补偿投切装置作为控制保护装置，将低压电容器组补偿在大用户 0.4kV 母线上的补偿方式。补偿电容器的固定连接组可起到相当于随器补偿的作用，补偿用户自身的无功基荷；可投切连接组用于补偿无功峰荷部分。投切方式分为自动和手动两种。一般地，用户负荷有一定的波动性，故推荐选用自动投切方式，采用无功补偿自动投切装置。此种装置可较好地跟踪无功负荷变化，运行方式灵活，运行维护工作量小。

考虑到电机投运的不同时率和单台电机补偿容量的限制等因素，对于较大的工业企业用户，采用跟踪补偿比随机、随器补偿能获得更好的补偿效果，而且不需要提高补偿度，并可适当调整各组电容器的运行时间，使其寿命相对延长，从而降低电器的购置更新费用。但是，跟踪补偿所需的自动投切装置较随器、随机补偿的控制保护装置复杂，功能更完善，初投资也大一些。

四、自动投切装置的选择

自动投切装置的选择应特别注意其性能和质量。必须满足以下五个条件：

(1) 能根据无功负荷的变化自动投切电容器组，使功率因数保持在 0.95 以上且不过补偿。

(2) 能实现电容器组自动循环投切，使电容器、接触器使用几率接近、延长使用寿命。

(3) 元器件性能稳定可靠，受环境影响小，便于维护。

(4) 具有过电压保护功能。

(5) 在轻负荷时，不会引起电容器组投切振荡现象。

投切振荡现象是指在分组自动投切电容器时，未投入某一组电容器其功率因数低于给定的下限，而投入后又高于其上限，于是在自控器的作用下反复进行投切。

五、补偿容量的配置

补偿容量的配置有以下几种：

(1) 变电所集中装设的补偿容量可以按照主变容量的 20%~40% 来选择。

(2) 配电线路上的分散补偿容量通常可以按照“三分之二”法则来选择。即在均匀分布负荷的配电线路上，安装电容器的最佳容量是该线路平均负荷的 2/3；安装最佳地点是自送端起的线路长度的 2/3 处。这一结论是在理想情况下推演出来的，因此在应用时，应根据具体情况具体分析，不能一概而论。

(3) 电动机就地补偿以不超过电动机空载时的无功消耗为原则，配变低压侧电容器补

偿要防止轻负荷时向 10kV 配电网倒送无功。

另外，在电容器的安装方式上又有固定安装和自动投切之分。

固定安装的电容器在选择容量时，为了防止轻负荷时向系统倒送无功，只能按照负荷低谷值来选择补偿容量。这样，在负荷峰值时补偿量就不足。而自动投切根据用户的负荷状况和电网的实时运行参数，进行并联电容器组的自动控制，以达到合理补偿和减少电能损耗的目的。美国 COOPER 公司生产的无功补偿自动投切系统主要由投切开关、控制器及电容器组成。此投切开关为固体绝缘、真空开断，无油、无气、免维护。控制器可根据电压、电压的改变以及电流、功率因数、有功功率、无功功率、温度、时间等参数的任意组合来控制电容器组的投切，因此，其是一种高压线路无功补偿电容器组的智能化投切装置，可以满足配电系统自动化时要求。

在工作中应该注意的是，并联电容器和大多数别的电器不同，当其接于电力系统中使用时，总是在满负荷下运行，仅在电压或频率波动时，负荷才稍有变动。另外，电容器是以电介质工作的一种电器，它的设计一般是在可靠的基础上力求经济合理。如果在运行中电压、电流和温度超过了规定的限度，就会导致电容器的寿命缩短，因此应严格控制电容器的运行条件，并在选择电容器时注意以下几点：

(1) 过电压能力。一般电容器的过电压能力至少应该能够达到 1.1 倍额定电压，国外一些品牌电容器的过电压能力可能更高。

(2) 耐受短路放电能力。电容器必须能承受在允许的运行电压下由于外部故障所引起的短路放电。此参数体现了电容器对外部故障的承受能力。

当然，还应注意电容器的抗涌流能力，以及环境温度差别等。另外，由于电容器是接在电力系统中运行的，当然也要消耗有功功率，所以在选择中也应注意电容器的损耗。一般来说，电容器的损耗应包含形成电容器的整体的一部分的熔丝，放电装置等的损耗。而电容器的损耗与无功功率的比值我们称之为损耗角正切。一般的电容器厂家都可以提供此参数，但要注意这个参数是有单位的，国内的厂家一般是以 $\text{tg}\delta\%$ 为单位，而国外一般是以 W/var 为单位，两者数量级是不同的，选择时应予以注意。

第二节 配电网无功平衡

一、概述

在电力网中为了降低线路损耗，提高功率因数和电压质量，通常要装设电容器，以补偿无功的不足。因此，在进行无功规划时，其内容包括两方面：其一是通过网路内无功平衡计算，掌握系统无功电源和无功负荷的分布，确定无功补偿需求量；其二是根据已知无功缺额计算，确定最优补偿方案和补偿容量。

在电力系统中，无功电源与无功负荷失去平衡时，会引起系统电压的升高或下降。无功功率的平衡与有功功率的平衡不同，应本着分层、分区、就地平衡的原则。无功功率的平衡应做出日、月、季、年的平衡计划。其计划包括：

1. 次日的无功平衡

主要考虑次日的最大负荷及最小负荷时的无功功率平衡。最大负荷时主要考虑由于无

功率不足引起的电压下降,如无功电源不缺时,则应当进一步考虑无功电源的合理利用,经济分配问题。最小负荷时主要考虑无功功率过剩引起的电压升高,对进相运行的发电机尚应考虑发电机的稳定及端部过热问题。

2. 下月的无功平衡

根据下月的计划负荷及计划检修情况,首先进行总的无功功率平衡。如果总的无功电源及总的无功负荷能够平衡时,就应当进一步分地区核算各个地区的无功功率平衡。在所有的调压设备都得到充分利用的条件下,电压质量还不能满足要求时,应争取部分用户,尤其是电压低的地区的用户,用电设备检修或减少无功负荷的耗用量。如果有功及无功功率同时不足,且需用限制部分负荷来达到有功功率平衡时,则应考虑到限制负荷后,负荷功率因数可能变坏的情况。

3. 下季分月的无功平衡

季度的无功功率平衡,除了要考虑上述原因外,尚应考虑新增加的无功电源和原有无功电源及无功负荷的季节性变化。如排灌季节、电网主汛期水电大发、冬季供暖负荷、夏季空调负荷的变化等。同时,在水、火电厂的出力比例发生较大变化时,超高压输电线上传输功率及其引起的功率损失也会有较大变化,在无功平衡时应予以注意。

4. 下年分季的无功平衡

下一年的无功功率平衡可以根据当年的实际无功负荷水平及下一年预计增加的无功电源和无功负荷进行总的和分地区的无功功率平衡。

总之,无功平衡是网内所有无功电源所供出的无功功率应与网内所有传输设备和网内所有的无功负荷所需的无功功率相平衡,其将是一个比有功平衡更复杂的问题。一方面,不仅要考虑总的无功功率平衡,还要考虑分地区的无功平衡,还要计及超高压线路充电功率、网损、线路改造、投运、新变压器投运及大型用户各种对无功平衡有影响的变化,只有考虑了以上种种因素之后,才能做好无功功率的平衡工作。另外,加强对用户及地区受电功率因数的监督、考核是做好无功平衡及电压调整工作的有力措施。

二、无功平衡的方程式

电网无功平衡的条件是

$$Q_{\max} = Q_{zd} \quad (1-1)$$

$$Q_{\max} = \sum Q_F + \sum Q_S + \sum Q_B + \sum Q_C + \sum Q_T \quad (1-2)$$

式中 $Q_{\max}$ ——电网无功电源总容量;

$\sum Q_F$ ——网内所有发电厂可调出力;

$\sum Q_S$ ——电力系统注入的无功功率;

$\sum Q_B$ ——网内现有的无功补偿容量;

$\sum Q_C$ ——网内 110kV 线路注入的无功功率;

$\sum Q_T$ ——网内所有的调相机功率。

而

$$Q_{zd} = \sum Q_N + \sum Q_M + \sum Q_L \quad (1-3)$$

式中 Q_{zd} ——网内无功负荷;

$\sum Q_N$ ——网内各变电所二次侧所带的无功负荷;

$\sum Q_M$ ——网内各主、配变无功功率损失;

ΣQ_L ——网内配电线路无功功率损失。

当规划区内的无功功率不能平衡时，其新增加的补偿容量为

$$Q_A = Q_{zd} - \Sigma Q_F + \Sigma Q_S + \Sigma Q_B + \Sigma Q_C + \Sigma Q_T \quad (1-4)$$

根据电压等级的不同，补偿后的功率因数应达到表 1-1 所列的数值。

表 1-1 功率因数与电压等级的关系

电压等级 (kV)	220	35~110	电压等级 (kV)	220	35~110
功率因数	0.95 以上	0.9 以上	无功功率/有功功率	0.33~0	0.48~0

三、无功补偿容量的规划法

1. 应用综合 K 值法确定无功补偿容量

综合 K 值法是根据电力网的实际运行资料，利用统计的方法确定 K 值，以 K 值来确定网内的无功需求量。综合系统 K 通常称为无功需用系数，其定义为

$$K = \frac{Q_{\max}}{P_{\max}} \quad (1-5)$$

式中 $Q_{\max}$ ——规划地区最大无功负荷；

$P_{\max}$ ——规划地区最大有功负荷。

对于 110~220kV 的电网来说， K 值为 1.2~1.3，对农网来说， K 取 1.4。表 1-2 中列出了我国几个主要城市的 K 值。

表 1-2 我国几个主要城市的 K 值表

电 网	大连	上海	沈阳	长春	哈尔滨	鞍山	丹东	长沙
K	1.1	1.27	1.2	1.2	1.2	1.05	1.2	1.25

2. 应用等网损微增率进行无功补偿容量的合理分配

在规划中，当总的补偿容量确定之后，在网内如何进行具体的分布，以便输送无功功率所引起的网损最小，获得最佐的补偿效益，这是一个非常重要的问题，为了解决这个问题必须研究无功补偿容量的最优分布问题。研究这个问题采用的计算方法是等网损微增率准则。等网损微增率是一个非线性规划问题，或者说是一个多元函数求极值的问题，其方法是：在确定目标函数和约束条件后，应用拉格朗日乘数法求得最优分布条件。

这里的目标函数是与补偿装置有关部分的电力网总有功功率损耗 ΔP_{Σ} ，有

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma}(Q_{Ci}) \quad (1-6)$$

补偿装置的总容量 ΣQ_{Ci} ，网络总的无功负荷 ΣQ_L ，以及网络的无功损耗 ΔQ_{Σ} ，应保持平衡，这就构成了无功电源最优分布的等约束条件

$$\Sigma Q_{Ci} - \Sigma Q_L - \Delta Q_{\Sigma} = 0 \quad (1-7)$$

此外，在分析无功电源的分布时，还要考虑以下两个不等式约束条件

$$Q_{cimin} < Q_{Ci} < Q_{cimmax} \quad (1-8)$$

$$U_{imin} < U_i < U_{imax} \quad (1-9)$$

运用拉格朗日乘数法,求解最优分布条件时,必须引进参数 λ ,构成辅助目标函数这样,才能把一个约束极值问题化为无约束的极值问题。这个辅助目标函数是

$$M = \Delta P_{\Sigma} - \lambda(\sum Q_{ci} - Q_i - \Delta Q_{\Sigma}) \quad (1-10)$$

为了求得 M 的极小值,取 M 相对于 Q_{ci} 和 λ 的偏导数,并命其为0,即

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial Q_{ci}} &= \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{ci}} - \lambda \left[1 - \frac{\partial \Delta Q_{\Sigma}}{\partial Q_{ci}} \right] = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial \lambda} &= \sum Q_{ci} - \sum Q_i - \Delta Q_{\Sigma} = 0 \end{aligned}$$

如此有

$$\frac{\partial \Delta Q_{\Sigma}}{\partial Q_{ci}} \frac{1}{1 - \frac{\partial \Delta Q_{\Sigma}}{\partial Q_{ci}}} = \lambda \quad (1-11)$$

当不考虑无功损耗时,有

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{ci}} = \lambda \quad (1-12)$$

式(1-12)就是等网损微增率的基本公式,它说明每增加一个单位的无功补偿容量,所获得的网络损耗减小相等。故

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial Q_{C1}} &= \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_{C2}} = \frac{\partial \Delta P_3}{\partial Q_{C3}} = \dots = \frac{\partial \Delta P_n}{\partial Q_{Cn}} \\ \sum_{i=1}^n Q_{Ci} - \sum_{i=1}^n Q_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中 $\frac{\partial \Delta P_1}{\partial Q_{C1}}, \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_{C2}}, \dots, \frac{\partial \Delta P_n}{\partial Q_{Cn}}$ ——通过某段线路上的功率损耗对该段线路终端无功功率补偿容量的偏微分。

略去推导得到

$$(Q_1 - Q_{C1})R_1 = (Q_2 - Q_{C2})R_2 = (Q_3 - Q_{C3})R_3 = \dots = (Q_n - Q_{Cn})R_n \quad (1-14)$$

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (1-15)$$

式中 R ——装设无功补偿设备的所有各条线路 $R_1 \sim R_n$ 的等值电阻, Ω ,如图1-1所示。

安装在各点的无功补偿容量按下式计算

$$\left. \begin{aligned} Q_{C1} &= Q_1 - \frac{(Q - Q_c)R}{R_1} \\ Q_{C2} &= Q_2 - \frac{(Q - Q_c)R}{R_2} \\ &\dots\dots \\ Q_{Cn} &= Q_n - \frac{(Q - Q_c)R}{R_n} \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

3. 110kV 变电所补偿规划算例分析

已知某110kV变电所35kV母线上有三条线路,如图1-2所示, $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6$ 为各点的无功功率,该网络总补偿容量为5.975Mvar,求各点,即 $Q_{C1}, Q_{C2}, Q_{C3}, Q_{C4}, Q_{C5}, Q_{C6}$ 的补偿容量。

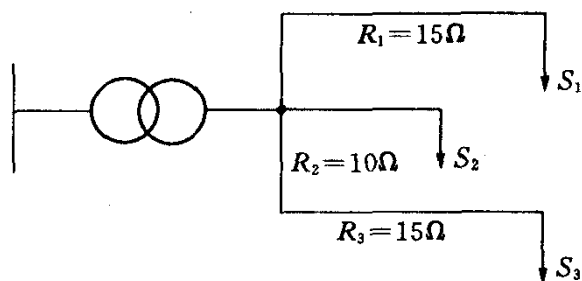


图 1-1 配电线路图

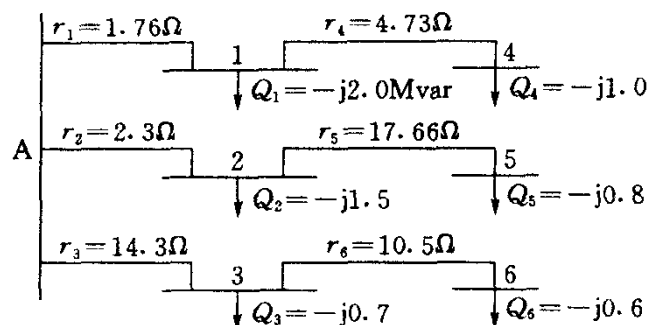


图 1-2 110kV 变电所无功补偿图

解 求各元件中的无功功率。

通过线路 A—1 段中的无功功率 Q_{A-1} 为

$$Q_{A-1} = Q_1 + Q_4 - Q_{C1} - Q_{C4} = 2.0 + 1.0 - Q_{C1} - Q_{C4} = 3.0 - Q_{C1} - Q_{C4}$$

通过线路 1—4 段中的无功功率 Q_{1-4} 为

$$Q_{1-4} = Q_4 - Q_{4C} = 1.0 - Q_{4C}$$

通过线路 A—2 段中无功功率 Q_{A-2} 为

$$Q_{A-2} = Q_2 + Q_5 - Q_{C2} - Q_{C5} = 1.5 + 0.8 - Q_{C2} - Q_{C5} = 2.3 - Q_{C2} - Q_{C5}$$

通过线路 2—5 段中无功功率 Q_{2-5} 为

$$Q_{2-5} = Q_5 - Q_{C5} = 0.8 - Q_{C5}$$

通过线路 A—3 段中无功功率 Q_{A-3} 为

$$Q_{A-3} = Q_3 + Q_6 - Q_{C3} - Q_{C6} = 0.7 + 0.6 - Q_{C3} - Q_{C6} = 1.3 - Q_{C3} - Q_{C6}$$

通过线路 3—6 段中无功功率 Q_{3-6} 为

$$Q_{3-6} = Q_6 - Q_{C6} = 0.6 - Q_{C6}$$

各点网损微增率和补偿容量为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial Q_{C1}} &= \frac{-2Q_{A-1}R_1}{U^2} = \frac{-2 \times (3 - Q_{C1} - Q_{C4}) \times 1.76}{U^2} \\ &= -\frac{10.56 - 3.52Q_{C1} - 3.52Q_{C4}}{U^2} \\ \frac{\partial \Delta P_4}{\partial Q_{C4}} &= -\frac{10.56 - 3.52Q_{C1} - 3.52Q_{C4}}{U^2} - \frac{2 \times (1 - Q_{C4}) \times 4.73}{U^2} \\ &= -\frac{20.02 - 3.52Q_{C1} - 12.98Q_{C4}}{U^2} \end{aligned}$$

同样求得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_{C2}} &= -\frac{10.58 - 4.6Q_{C2} - 4.6Q_{C5}}{U^2} \\ \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_{C5}} &= -\frac{38.826 - 4.6Q_{C2} - 39.92Q_{C5}}{U^2} \\ \frac{\partial \Delta P_3}{\partial Q_{C3}} &= -\frac{37.18 - 28.6Q_{C3} - 28.62Q_{C6}}{U^2} \\ \frac{\partial \Delta P_6}{\partial Q_{C6}} &= -\frac{49.78 - 28.6Q_{C3} - 49.6Q_{C6}}{U^2} \end{aligned}$$

经计算得: $Q_{C4}=1.0\text{Mvar}$, $Q_{C5}=0.8\text{Mvar}$, $Q_{C6}=0.6\text{Mvar}$ 。

根据

$$\frac{\partial \Delta P_1}{\partial Q_{C1}} = \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_{C2}} = \frac{\partial \Delta P_3}{\partial Q_{C3}}$$

$$\begin{aligned} Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3} &= 5.975 - Q_{C4} - Q_{C5} - Q_{C6} \\ &= 5.975 - 1.0 - 0.8 - 0.6 \\ &= 3.575 \text{ (Mvar)} \end{aligned}$$

得到: $Q_{C1}=1.67\text{Mvar}$; $Q_{C2}=1.25\text{Mvar}$; $Q_{C3}=0.655\text{Mvar}$ 。

4. 35kV 配电网无功补偿优化计算例分析

今有 35kV 变电所, 其配电网路单线图如图 1-3 所示。全线路均为架空三角形排列, 导线采用 LGJ 钢芯铝绞线, 8 座 35kV 变电所主变均为 SJL 系列, 图中接点 9 为参考接点。

在最大运行方式下 U_9 为 37kV。图 1-4 为图 1-3 的等效电路。

(1) 补偿前网络的运行状况。

各变电所最大运行方式下所带负荷 (kVA) 为:

$S_1: 400 + j491$; $S_2: 653 + j723$; $S_3: 617 + j564$; $S_4: 516 + j609$; $S_5: 760 + j872$; $S_6: 1445 + j1382$; $S_7: 569 + j792$; $S_8: 561 + j711$ 。

网络视在总功率为: $5909.068 + j6830.43$ (kVA)。

有功网损为: 298.068 (kW) 网损率为 5.3% (负荷形状系数 K 取 1.05)。

功率因数为 $\cos\varphi=0.658$ 。

网络最低点母线电压: U 为 34.801 (kV)。

(2) 网络现有 3360kvar 补偿容量的运行状态。

若不按优化方案对 8 个变电所进行无功补偿, 则各补偿点的补偿容量 (kvar) 为

$Q_{C1}: 330$; $Q_{C2}: 450$; $Q_{C3}: 330$; $Q_{C4}: 450$; $Q_{C5}: 300$; $Q_{C6}: 630$; $Q_{C7}: 450$; $Q_{C8}: 420$ 。

由潮流分布计算可得网络总功率为

$$S_z = 5784.857 + j4011.104 \text{ (kVA)}$$

有功网损: $\Delta P=173.857$ (kW)。

损失率为: 3.16% 。

功率因数 $\cos\varphi=0.817$ 。

最低点母线电压: $U_6=35.251$ (kV)。

(3) 按等网损微增率优化分配补偿容量, 因为

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R$$

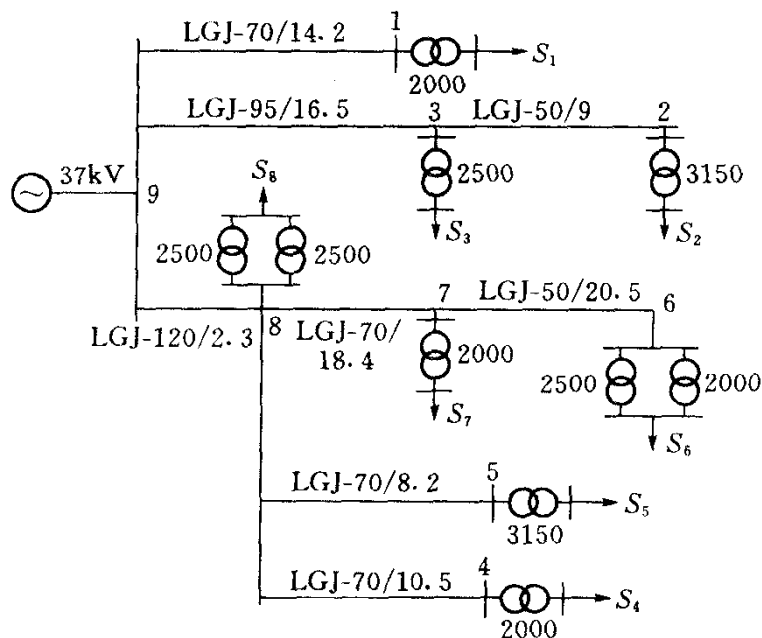


图 1-3 35kV 配电网路单线图

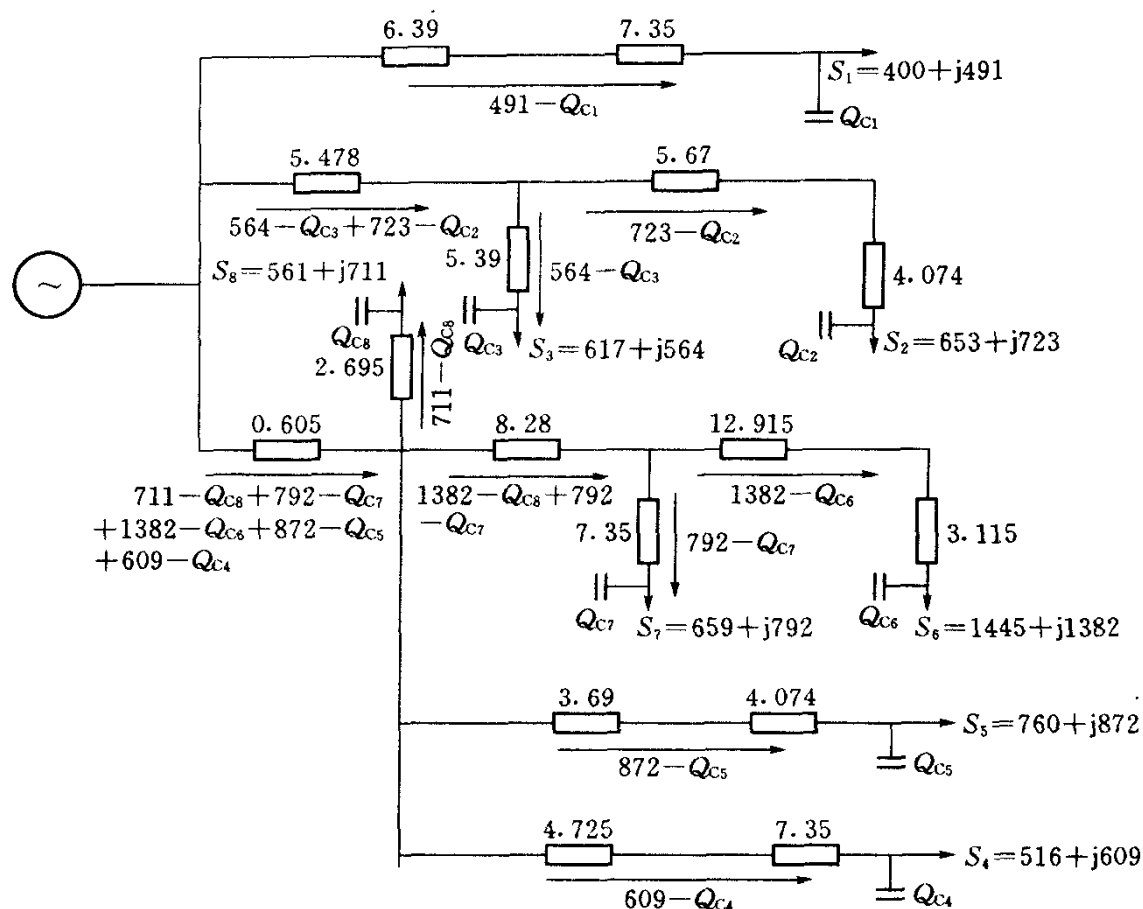


图 1-4 图 1-3 的等效电路

上式中的后半部分即为无功在电网中流动引起的有功损耗。

图 1-4 可知电网进行补偿后无功分量在网络中流动引起的有功损耗表达式为

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{1}{U^2} \sum_{n=1}^8 (Q - Q_{cn})^2 R$$

再根据等网损为增率准则

$$\frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{C1}} = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{C2}} = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{C3}} = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{C4}} = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{C5}} = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{C6}} = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{C7}} = \frac{\partial \Delta P_{\Sigma}}{\partial Q_{C8}} = \lambda$$

问题的约束条件

$$Q_{C1} + Q_{C2} + \dots + Q_{C8} = 3360$$

得到一组能满足容量分配的 8 个方程，解出结果，其中 Q_{C8} 为负值，说明变电所不需要补偿。令 $Q_{C8}=0$ ，按上述步骤重新建立方程组，最后解得： $Q_{C1}=122$ ， $Q_{C2}=521$ ， $Q_{C3}=199$ ， $Q_{C4}=281$ ， $Q_{C5}=360$ ， $Q_{C6}=1288$ ， $Q_{C7}=589$ ， $Q_{C8}=0$ 。

由潮流分布计算可得优化的电网运行情况，网络总功率： $5772.222 + j3993.947$ (kVA)。

有功网损： $\Delta P = 161.222$ (kW)；损失率：2.93%。

功率因数： $\cos \varphi = 0.822$ 。

最低点母线电压： $U_6 = 35.547$ (kV)。

(4) 提高补偿容量使 $\cos \varphi = 0.9$ 时的电网运行状况。

由前述可知视在功率 $S_z = 5772.222 + j3993.947 = P_{\Sigma} + jQ_{\Sigma}$

当 $\cos \varphi = 0.9$ 时， $\tan \varphi = 0.484$ ， $Q_{\Sigma} = P_{\Sigma} \times \tan \varphi = 2793.755$ ，则有

$$Q_c = Q_{\Sigma} - Q'_{\Sigma} = 3993.947 - 2793.755 = 1200 \text{ (kvar)}$$

即当功率因数由 0.82 提高到 0.9 时, 电网需要增加补偿容量为 1200kvar, 这是网络总补偿容量为 $3360+1200=4560$ (kvar)。

按照前面优化计算的方法和步骤, 建立满足最优容量分配的方程组, 解得的各补偿点分配的容量如下: $Q_{C1}=315$, $Q_{C2}=627$, $Q_{C3}=390$, $Q_{C4}=466$, $Q_{C5}=647$, $Q_{C6}=1341$, $Q_{C7}=703$, $Q_{C8}=71$ 。

由潮流分布计算的 S_z 为

$$S_z = 5728.04 + 2765.07 \text{ (kVA)}$$

有功网损: $\Delta P=117.04$ (kW); 网损率为 2.15%。

功率因数: $\cos\varphi=0.901$ 。

网络最低点母线电压: $U_6=36.04$ (kV)。

各种情况下的计算结果见表 1-3, 由表 1-3 可见:

表 1-3 各种情况下计算结果

	电容器	有功网损率 (kW)	功率因数	最低点电压 (kW)
补偿前	0	5.3	0.658	34.801
现有补偿未优化	3360	3.16	0.817	35.251
现有补偿优化后	3360	2.93	0.822	35.547
增加电容优化后	4560	2.15	0.901	36.04

(1) 电容补偿对降低网损, 提高功率因数, 改善电压水平等都有明显的效果。

(2) 不合理的补偿分配方式, 取得的效果不同。

(3) 对给定补偿容量的电网进行优化分布计算, 可以同时确定各负荷点的最优补偿容量和补偿顺序, 并能获得最高的补偿效益。

电容投资回收年限分析如下:

设电容器单价为 50 元/kvar, 电价为 0.3 元/(kW·h), 电容器年投运时间为 6000h, 则 3360kvar 电容器费用为 16.8 万元; 年节电量为: $(298.68-161.222) \times 6000=82.1$ 万 kW·h, 节约费用: $82.1 \times 0.3=24.63$ 万元, 即于一年可收回电容器的投资费用。

第三节 电力网供电区无功优化

一、无功电压优化运行的基本原则

地区电网无功电压优化运行系指利用地区调度自动化的手段, 即利用遥测、遥信、遥控、遥调四大功能, 对地区调度中心的 220kV 以下变电所的无功、电压和网损进行综合性处理。无功电压优化运行的基本原则是:

(1) 以地区电力网网损最小最佳为目标, 以电力网各接点的电压合格为约束条件。

(2) 集中控制变压器有载分接开关档位调节和变电所无功补偿设备的投切, 以此来达到全网无功就地平衡, 全面改善和提高电网的电压质量、降低电能损耗的目的。

为此, 对于那些以变电所高压集中补偿和 10kV 线路补偿为主, 固定补偿居多数的地