



电力实用技术丛书

中低压电网 无功补偿实用技术

► 主 编 赵新卫
► 副主编 于秀云 刘 斌



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



电力实用技术丛书

- ▶ 电力通信实用技术问答
- ▶ 继电保护常见故障分析与处理
- ▶ 电力变压器及其保护知识问答
- ▶ **中低压电网无功补偿实用技术**
- ▶ 线损管理与降损技术问答
- ▶ 电力自动化实用技术问答
- ▶ 电力调度实用技术问答
- ▶ 农电综合实用管理知识问答



责任编辑：张 剑

封面设计：徐海燕

本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书。

ISBN 978-7-121-12464-8



9 787121 124648 >

定价：22.00元



电力实用技术丛书

中低压电网 无功补偿实用技术

► 主 编 赵新卫
► 副主编 于秀云 刘 斌
► 参 编 周志军 贾永莲 张丹惠
张绍通 王 娟

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了中低压电网无功补偿实用技术。全书共 10 章, 主要内容包括无功补偿的规划与发展动向, 无功补偿和功率因数, 无功补偿的经济效益分析, 无功补偿方案的确定与实现, 无功补偿容量的确定和安装位置的优化, 无功补偿装置的设计、选择及控制, 动态无功补偿在电网中的应用, 电容器的控制与保护, 补偿电容器在运行中的异常现象, 电力电容器的运行与维护。

本书通俗易懂、实用、涉及面广, 是一本难得的中低压电网无功补偿技术参考书。本书适合于工矿企业、电力部门的无功补偿专责及工程技术人员阅读, 也可作为无功补偿岗位培训、相关专业职业教育的教学用书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

中低压电网无功补偿实用技术/赵新卫主编. —北京: 电子工业出版社, 2011.1
(电力实用技术丛书)

ISBN 978-7-121-12464-8

I. ①中… II. ①赵… III. ①电力系统—无功补偿 IV. ①TM714.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 236416 号

责任编辑: 张 剑 (zhang@phei.com.cn)

特约编辑: 郭 莉

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 880×1230 1/32 印张: 8.25 字数: 253 千字

印 次: 2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 6 000 册 定价: 22.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

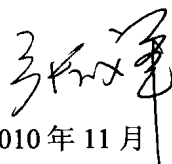
服务热线: (010) 88258888。

从 书 序

电力工业是关系国计民生的基础产业，是技术与资金密集型的高科技行业。改革开放以来，随着科学技术的发展和电力生产建设规模的不断扩大，电力系统正在朝着高电压、大容量、远距离输送、全国联网的高科技智能电网方向发展。

为了适应电力建设和智能电网迅速发展的需要，提高电力系统职工队伍的技术业务素质，并对从事变电所、供/配电电气运行的技术人员进行正规化、系统化的培训，特组织编写了电力实用技术丛书（共分为 8 册），主要阐述了电力系统通信、继电保护、电力变压器、电网无功补偿、线损管理与降损技术、电力系统自动化、调度运行及农电综合管理等方面的内容，总结和分析了电力系统变电所、供/配电及用电等各个环节的电气运行情况、电气设备及安全管理知识。本书不仅是变电所、供/配电及用电单位的设计、施工、运行、维护和技术管理人员的必备用书，也可作为工矿企业供/配电工人岗位培训、职业教育相关专业的教学用书。

相信“电力实用技术丛书”的出版，会对电力建设和智能电网的发展，提高电力系统职工队伍技术业务素质，起到积极的促进作用。



2010 年 11 月

目 录

第 1 章 无功补偿概述	1
1.1 国内外无功补偿现状与发展动向	1
1.1.1 无功补偿装置简介	1
1.1.2 各种补偿装置对比	5
1.1.3 无功补偿技术的发展动向	6
1.2 配网无功补偿的规划	9
1.2.1 规划的目的和要求	9
1.2.2 配网运行电压的现状	10
1.2.3 配网中常用的电压调整及措施	11
1.2.4 无功补偿的容量、地点及补偿方式	11
1.2.5 无功补偿规划的优化	12
第 2 章 无功补偿和功率因数	18
2.1 无功补偿的一般概念	18
2.1.1 无功补偿的基本原理	18
2.1.2 有功功率与无功功率	19
2.1.3 功率因数	21
2.1.4 效率	24
2.1.5 电压水平与无功补偿	24
2.2 功率因数调整电费办法简介	25
2.2.1 功率因数调整电费办法的规定	25
2.2.2 现行办法的不足	29
2.2.3 修订建议	30
2.3 功率因数的测算和提高自然功率因数的方法	31
2.3.1 常用的功率因数测算方法	31
2.3.2 典型设备的自然功率因数	33
2.3.3 提高自然功率因数的方法	34

2.4	电力用户经济功率因数值的确定	36
2.4.1	经济功率因数的确定	36
2.4.2	经济功率因数的用户受益情况分析	38
第3章	无功补偿的经济效益分析	40
3.1	无功补偿降损节电效益分析	40
3.1.1	提高供/配电设备的供电能力	40
3.1.2	降低线路和配电变压器损耗	41
3.1.3	改善电压质量	43
3.1.4	减少用户电费支出,降低生产成本	44
3.1.5	无功补偿降损节电案例分析	45
3.2	电容器就地补偿的节能作用	47
3.2.1	减少电能损耗	47
3.2.2	减少线路电压降	47
3.2.3	提高系统稳态电压	48
3.2.4	改善功率因数	49
3.2.5	电容器就地补偿的效益分析	49
3.3	电网电压稳定与无功补偿	51
3.3.1	电压稳定与无功功率平衡的重要作用	51
3.3.2	电力系统电压控制方式	52
3.3.3	电压稳定与无功补偿	53
3.3.4	改善电压稳定性的方法与措施	55
3.4	无功补偿对电压损失的影响及其经济当量分析	56
3.4.1	无功补偿对电压损失的影响	56
3.4.2	无功补偿经济当量	57
3.4.3	无功补偿的综合效益分析	59
第4章	无功补偿方案的确定与实现	62
4.1	配电网无功补偿技术	62
4.1.1	配电网无功补偿配置的原则	62
4.1.2	配电网无功补偿方案的实施	63

4.1.3	产品选型及注意事项	67
4.2	电动机无功功率就地补偿技术	68
4.2.1	电动机无功补偿配置的原则	69
4.2.2	电动机无功就地补偿方案的实施	69
4.2.3	电动机就地无功补偿容量的配置	71
4.3	配电变压器无功补偿技术	73
4.3.1	配电变压器无功补偿配置的原则	73
4.3.2	配电变压器无功补偿容量的配置	74
4.3.3	变压器无功损耗及补偿	75
4.3.4	无功补偿效益实测	76
4.4	照明系统无功补偿技术	77
4.4.1	照明系统补偿电容器的选用	78
4.4.2	照明系统无功补偿方案的实施	79
4.5	三相不平衡负荷无功补偿技术	80
4.5.1	“混合补偿”无功补偿方案的原理	80
4.5.2	“混合补偿”无功补偿方案的设计	81
4.5.3	“混合补偿”无功补偿方案控制器的特点	84
4.6	10kV 线路无功自动补偿装置	85
4.6.1	工作原理	85
4.6.2	控制策略	86
4.6.3	系统实现	88
第 5 章	无功补偿容量的确定和安装位置的优化	90
5.1	确定无功补偿容量的计算方法	90
5.1.1	无功功率补偿容量的计算	91
5.1.2	无功补偿容量的确定	94
5.2	企业无功功率的最佳补偿容量	99
5.2.1	最佳补偿容量的确定	99
5.2.2	企业最佳补偿容量分析	102
5.3	电动机就地无功补偿容量	103
5.3.1	电动机无功就地补偿容量的确定	104

5.3.2	电动机无功补偿的相关技术问题	107
5.3.3	电动机就地无功补偿计算步骤	109
5.4	配电线路的无功补偿和无功优化	110
5.4.1	线路无功优化和补偿原则	110
5.4.2	配电线路无功补偿的优化配置	111
5.4.3	配电线路最优无功补偿分析	114
第 6 章	无功补偿装置的设计、选择及控制	118
6.1	并联电容器装置设计分析	118
6.1.1	并联电容器装置的设计原则	118
6.1.2	并联电容器装置的设备选型	120
6.1.3	电容器安装与电容器组布置	123
6.2	无功补偿投切元件的选择	124
6.2.1	无功补偿投切元件的特性	124
6.2.2	投切元件的选择原则	127
6.3	柱上式自动投切高压电容器装置	128
6.3.1	柱上式自动投切高压电容器装置的结构	128
6.3.2	未设置串联电抗器和放电线圈的原因	130
6.3.3	运行中的技术问题	132
6.4	调压型电压无功自动调节装置	134
6.4.1	无功补偿配置的状况	135
6.4.2	装置原理与技术方案	135
6.4.3	两个关键问题的解决	138
6.4.4	装置运行情况分析	138
6.5	智能式低压无功补偿装置	140
6.5.1	智能式低压无功补偿装置的设计	140
6.5.2	智能式低压无功补偿装置的功能实现	141
6.5.3	智能式低压无功自动补偿装置的应用	143
6.6	低压无功功率补偿装置 CCC 认证	144
6.6.1	无功功率补偿装置的主回路的设计	144
6.6.2	无功功率补偿装置涉及的主要标准	150

第 7 章 动态无功补偿在电网中的应用	151
7.1 晶闸管投切电容器动态无功补偿技术	151
7.1.1 晶闸管的导电特性	152
7.1.2 补偿回路的工作原理	152
7.1.3 TSC 的分类	153
7.1.4 主电路接线方案	154
7.1.5 晶闸管投切电容器动态无功补偿装置	156
7.2 CSAV 型低压无功自动补偿装置	157
7.2.1 装置特点	158
7.2.2 设计原理与技术实现	158
7.2.3 算法设计	163
7.2.4 仿真研究	163
7.3 动态补偿控制与实现	165
7.3.1 无功补偿控制器	165
7.3.2 无功补偿控制器的性能	167
7.4 PLC 在配电网无功补偿中的应用	168
7.4.1 系统硬件构成	168
7.4.2 系统软件设计	170
7.5 低压无功动态补偿装置的实际应用方案	175
7.5.1 工作原理	175
7.5.2 工程应用方案	176
第 8 章 电容器的控制与保护	179
8.1 电容器组接线方式的确定	179
8.1.1 电容器组最大并联台数	179
8.1.2 接线方式的选择	181
8.1.3 适用范围	182
8.2 无功补偿装置中电容器的保护方式	183
8.2.1 电力电容器一次主接线	183
8.2.2 电容器组保护的配置	184

8.3	电容器保护配置和整定计算	187
8.3.1	电容器保护配置和整定计算	187
8.3.2	保护整定实例分析	192
8.4	电容器的过电流、过电压保护	193
8.4.1	电容器过负荷的产生及预防措施	193
8.4.2	电容器的过电压来源及预防措施	194
8.4.3	过电流、过电压保护的交流回路	195
8.4.4	电容器控制和保护回路	195
8.5	微机电容器保护装置	197
8.5.1	应用范围	197
8.5.2	功能特点	197
8.5.3	技术参数	198
8.5.4	微机电容器保护装置的交流回路与操作回路	200
8.5.5	微机电容器保护装置的实际应用	203
第9章	补偿电容器在运行中的异常现象	206
9.1	电容器在运行中的异常现象及对策	206
9.1.1	合闸涌流产生的过电压	206
9.1.2	投入空载变压器的异常现象	208
9.1.3	并联补偿装置投切时开关重燃产生过电压	209
9.2	无功补偿中的谐波问题	211
9.2.1	并联电容器补偿存在的问题	211
9.2.2	系统谐波对补偿装置的危害	212
9.2.3	谐波治理	213
9.3	谐波引起的异常现象	215
9.3.1	一般性负载电路中电容器的异常过电流	215
9.3.2	高次谐波引起的谐振过电压	217
9.3.3	在整流器负载电路中电容器的异常电流	219
9.3.4	电弧炉用的电容器的过电流与异常噪声	220
9.4	并联电容器组群爆故障分析	221
9.4.1	并联电容器组群爆故障的特点	221

9.4.2	并联电容器组群爆故障的原因分析	222
9.4.3	预防措施	223
第 10 章	电力电容器的运行与维护	225
10.1	电力电容器的结构、接线及安装	225
10.1.1	电力电容器的结构	225
10.1.2	电力电容器的型号	225
10.1.3	电力电容器的接线方式	226
10.1.4	电力电容器的放电装置	228
10.1.5	电力电容器的安装	230
10.2	电力电容器的运行条件与检查维护	231
10.2.1	严格控制电力电容器的运行条件	231
10.2.2	电力电容器的巡视检查、运行维护	234
10.3	电力电容器常见故障	236
10.3.1	电容器常见故障原因分析及处理	236
10.3.2	处理故障电容器的安全措施	239
10.4	配电网低压无功补偿装置的安全运行管理	240
10.4.1	各类低压无功补偿装置运行情况	240
10.4.2	安全运行管理	242
10.5	无功补偿装置的故障维护与处理	242
10.5.1	控制器故障	243
10.5.2	熔断器故障	243
10.5.3	电容接触器故障	245
10.5.4	电容器故障	246
10.5.5	电容器的谐波与谐波过电流故障	247
10.5.6	电容器无功倒送故障	247

第 1 章 无功补偿概述

本章节提出了无功补偿的必要性，重点介绍了不同时期的无功补偿技术，以及应用于无功补偿的不同信号检测技术的各自优缺点，同时介绍了无功补偿装置自身谐波消除技术，分析了无功补偿技术的发展动向。最后结合城市电网的实际情况，介绍了如何科学地规划电网中的无功电源。

1.1 国内外无功补偿现状与发展动向

无功补偿对电力系统有着重要意义。对电力系统进行适当的无功补偿，可以稳定电网电压，提高功率因数和设备利用率，减小网络有功功率损耗，提高输电能力，平衡三相功率，为系统提供电压支撑，提高系统运行安全性和可靠性。

近年来，随着我国工业的迅速发展，大功率非线性负荷的不断增多，对电网的冲击和谐波污染也呈不断上升趋势，缺乏无功调节手段造成了母线电压随运行方式的变动很大，引发了多种电能质量问题。主要包括功率因数低、谐波含量高、三相不平衡、功率冲击、电压闪变和电压波动。鉴于以上所述种种危害，如何快速有效地补偿电力系统中的无功负荷，是相关科研人员正在研究和亟待解决的问题。

1.1.1 无功补偿装置简介

无功补偿装置类型如图 1-1 所示。

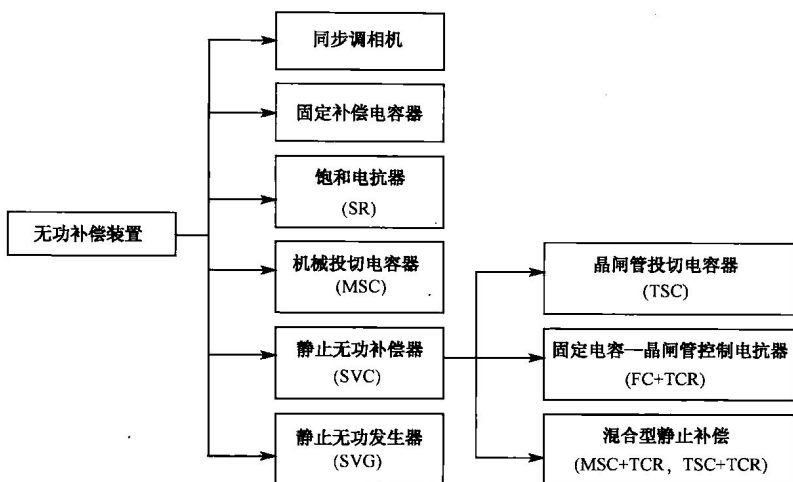


图 1-1 无功补偿装置类型

1. 早期的无功补偿技术

1) 同步调相机 同步调相机相当于空载运行的同步电动机。在过励磁运行时，它向系统供给感性无功功率，提高系统电压；在欠励磁运行时，它从系统吸取感性无功功率，降低系统电压。它有利于提高系统的稳定性，虽然目前仍有使用，但运行维护比较复杂，而且技术上已显得落后。

2) 固定补偿电容器 固定补偿电容器可以改善线路参数，减少线路感性无功功率，补偿系统无功。但由于它供给的无功功率与节点电压的平方成正比，当节点电压下降时，它供给的无功功率反而会减少，所以电容器的无功功率调节性能比较差。由于维护比较方便，装设容量不定，既可集中使用、又可分散装设，所以目前仍是我国主要的补偿方式。

2. 基于柔性交流输电系统 (FACTS) 的无功补偿技术

柔性交流输电系统 (Flexible AC Transmission System, FACTS) 是随着电力电子技术的发展及其在电力系统中的广泛应用而产生的。

目前基于 FACTS 技术且应用于无功补偿最为广泛的是静止无功补偿器 (SVC)，其作用是连续而迅速地控制无功功率，即以快速的响应，通过发出或吸收无功功率来控制它所连接的输电系统的节点电压。据有关资料统计，全世界至今有 400 多套，总容量约 30Gvar 的 SVC 装置在输配电系统运行；有 500 多套，总容量约 25Gvar 的 SVC 在工业部门使用。我国对 SVC 技术的研究与应用也有了较快的发展，并于 2002 年成功地应用了一套 100Mvar 的 SVC 装置。SVC 装置作为输配电系统动态无功补偿的主要实用技术，由于其维修简单、工作可靠，所以其应用较为广泛。尤其是晶闸管投切电容器在国内低压配电系统的应用更为普遍。

SVC 有以下几种形式：饱和电抗器型 (SR 型 SVC)、晶闸管投切电容器型 (TSC 型 SVC)、固定电容-晶闸管控制电抗器型 (FC+TCR 型 SVC)、机械投切电容器-晶闸管控制电抗器型 (MSC+TCR 型 SVC)，以及晶闸管投切电容器-晶闸管控制电抗器型 (TSC+TCR 型 SVC)，几种 SVC 装置的结构如图 1-2 所示。

3. TCSC

可控串联电容补偿 (TCSC) 是一种基于晶闸管控制的串联补偿装置。主要应用于电力输电系统，提高输电网的传输能力和系统稳定性，是近年来发展起来的先进的串联补偿技术。调整晶闸管的触发角便可在一定范围内连续调整串联电容的等值容抗或补偿度，TCSC 由于采用无触点的快速控制，因此具有如下功能。

(1) 由于可以连续改变等值串联电容的容抗，即可用来进行潮流控制，改变电网中的潮流分布。

(2) 可以阻尼由于系统阻尼不足或由于系统扰动引起的低频功率振荡，提高动态稳定性。

(3) 在系统受到大的扰动时，可迅速调整晶闸管的触发角，改变串联电容的补偿度，提高电力系统的暂态稳定。

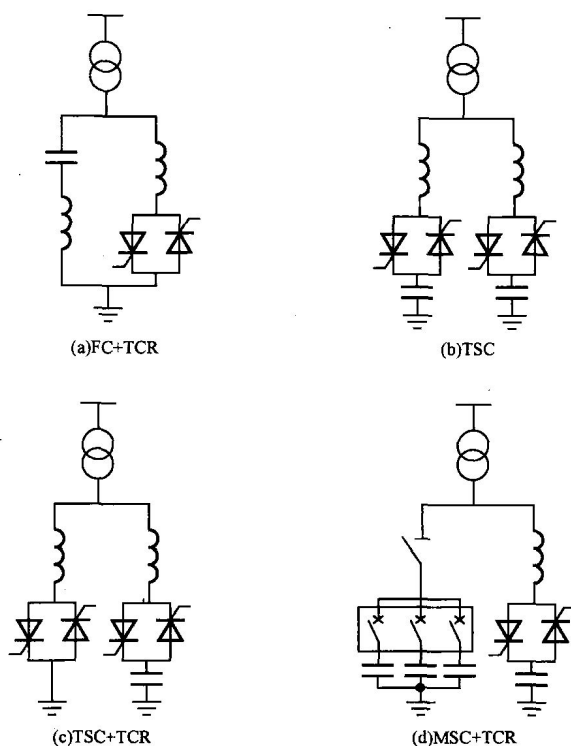


图 1-2 几种 SVC 装置的结构图

(4) 抑制次同步振荡的方法有两种：第一种方法是在发生次同步振荡时，迅速调整串联电容至最小值，对于次同步频率，TCSC 呈感抗，这样便会对 SSR 起很强的阻尼作用；第二种方法是采集当地的电流、电压，用矢量合成的方法获得远方发电机的转速相位，经过处理后用做对发电机轴振动的阻尼。

4. SVG

SVG 又称 STATCOM，即静止无功发生器或高级静止无功补偿器 (ASVC)，它是基于瞬时无功功率理论的无功电流检测方式，逆变主电路采用 IGBT 组成的 H 桥功率单元级联拓扑结构，并辅助以小容量

储能元件。它由几个电平台阶合成阶梯波以逼近正弦输出电压,这种逆变器由于输出电压电平数的增加,使得输出波形具有更好的谐波频谱,并且每个开关器件所承受的电压应力较小,不需要均压电路,可避免大 dv/dt 所导致的各种问题。因此这种逆变器可称为“完美无谐波”变流器。

SVG 分电压型和电流型桥式电路两种。由于电压型控制方便,损耗小,因此在实际应用中被广泛采用。通过调节桥式电路交流侧输出电压的相位、幅值或者直接调节其交流侧电流进行无功功率的交换。与 SVC 相比,其调节速度更快,调节范围更宽,欠电压条件下的无功调节能力更强,因此具有良好的补偿特性。日本关西电力公司与三菱电机公司共同研制并于 1980 年 1 月投运了世界上首台容量为 20Mvar 的 SVG 样机。1986 年 10 月,由美国国家电力研究院 (EPRI) 和西屋公司研制世界上首台采用大功率 GTO 作为逆变器元件的 $\pm 1\text{Mvar}$ 的 SVG 装置投入运行。之后,日本关西电力公司与三菱电机公司又采用 GTO 研制了 $\pm 80\text{Mvar}$ 的 SVG 装置,于 1991 年投入运行。美国 EPRI 与田纳西电力局、西屋电气公司合作,在 TVA 电力系统的 Sullivan 500kV 变电站建造了 $\pm 100\text{Mvar}$ 的 SVG 装置,于 1993 年 10 月投入运行。1993 年 3 月,东京电力分别将东芝公司和日立公司开发的 2 台 $50\text{MV}\cdot\text{A}$ 的 SVG 装置在东京所属新信浓变电所投入使用。1997 年,德国西门子公司开发研制的 8Mvar 的 SVG 装置安装在丹麦的 Rejsby Hede 风场。在我国,华北电力学院曾研制出强迫换相的晶闸管元件无功发生器实验装置,东北电力学院研制了 GTO 器件的 SVG 实验装置,1999 年 3 月,由河南省电力公司和清华大学共同研制的 $\pm 20\text{Mvar}$ 的 SVG 在河南洛阳的朝阳变电站并网成功,这是国内首台投入应用的大容量柔性交流输电装置。后来在上海西郊变 $\pm 50\text{Mvar}$ 的 SVG 成功运行。不过,目前 SVG 的工程应用方案主要用于补偿系统无功并带有试验的性质,距离大范围普遍应用还有很长的一段距离。

1.1.2 各种补偿装置对比

各种无功补偿装置性能的对比见表 1-1。