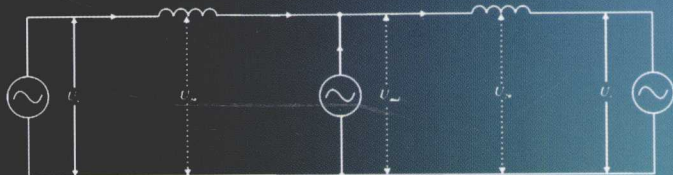


“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in  
Power Electronics



广州市科学技术学会

广州市南山自然科学学术交流基金会 资助出版

广州市合力科普基金会

◎ 程汉湘 编著

# 无功补偿 理论及其应用

WUGONG BUCHANG LILUN JIQI YINGYONG



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

广州市科学技术学会  
广州市南山自然科学  
广州市合力科普基金

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
电力电子新技术系列图书

# 无功补偿理论及其应用

程汉湘 编著

机械工业出版社

无功补偿是提高输、配电系统电能质量的有效途径,庞大的电力系统可借助远程通信方式实现工业园区、枢纽变电站、地区,乃至全省的无功优化调度和控制。本着通俗易懂、循序渐进的原则,本书除了介绍常规的并联型和串联型无功补偿的理论和控制外,还详细阐述了怎样通过无功补偿对三相不对称系统实现平衡补偿的理论和方法;推导并分析了各类电力滤波器的基本计算公式,以及实现滤波的控制。利用有载调压对无功的影响,书中专门介绍了变压器有载调压中的电压调节器和相位调节器、自动电压控制(AVC)系统,以及电压无功控制(VQC)等。考虑到磁控电抗器(MCR)和静止同步补偿器也逐渐融入到无功补偿的行列之中,并逐渐成为高电压等级无功补偿的重要形式,本书对它们的构成、实现原理,以及有关特性也进行了详细分析和计算说明。此外,书中还介绍了RTU、DTU、FTU、TTU等智能终端的概念及其在远程无功补偿控制中的作用。

本书特别注重应用算例与有关概念的有效联系,文字精炼、物理概念清晰、理论推导严密、前后逻辑对应,这一点始终贯穿于本书的所有章节。本书可作为电气工程类各专业工程技术人员和研究人员的参考书,对具体从事无功补偿的设计人员和电力系统的从业人员也有很高的参考价值,同时也能作为高年级本科生、研究生和电气工程专业教师的基础用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

无功补偿理论及其应用/程汉湘编著. —北京:机械工业出版社, 2016.1

“十二五”国家重点图书出版规划项目

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-52213-3

I. ①无… II. ①程… III. ①无功补偿 IV. ①TM714.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第280574号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:朱林 责任校对:陈延翔

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2016年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·29印张·566千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-52213-3

定价:79.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

第二届  
电力电子新技术系列图书  
编辑委员会

主任：徐德鸿

副主任：白继彬 牛新国 康 勇 李崇坚 杨 耕

委员：（按姓名拼音字母排序）

白继彬 陈 坚 陈道炼 陈守良 陈治明

高艳霞 郭 宏 郭世明 康 勇 李崇坚

李永东 刘进军 吕征宇 牛新国 潘三博

阮新波 孙流芳 孙玉坤 王旭东 王兆安

肖湘宁 徐德鸿 徐殿国 杨 耕 杨 旭

张 波 张承慧 张卫平 张 兴 查晓明

赵善麒 赵争鸣 钟彦儒 周 波 周维维

秘书组：陈守良 孙流芳 杨 旭 罗 莉

# 电力电子新技术系列图书

## 序 言

1974年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术学科的定义, 电力电子技术是由电气工程、电子科学与技术 and 控制理论三个学科交叉而形成的。电力电子技术是依靠电力半导体器件实现电能的高效率利用, 以及对电机运动进行控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科学技术, 几乎应用于科技、生产、生活各个领域: 电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造等。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。进入 21 世纪, 电力电子技术在节能减排方面发挥着重要的作用, 它在新能源和智能电网、直流输电、电动汽车、高速铁路中发挥核心的作用。电力电子技术的应用从用电, 已扩展至发电、输电、配电等领域。电力电子技术诞生近半个世纪以来, 也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前, 电力电子技术仍以迅猛的速度发展着, 电力半导体器件性能不断提高, 并出现了碳化硅、氮化镓等宽禁带电力半导体器件, 新的技术和应用不断涌现, 其应用范围也在不断扩展。不论在全世界还是在我国, 电力电子技术都已造就了一个很大的产业群。与之相应, 从事电力电子技术领域的工程技术和科研人员的数量与日俱增。因此, 组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列图书, 以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考, 促进电力电子技术及应用知识的普及。

在 20 世纪 80 年代, 电力电子学会曾和机械工业出版社合作, 出版过一套电力电子技术丛书, 那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近, 电力电子学会经过认真考虑, 认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此, 成立了专门的编辑委员会, 负责确定书目、组稿和审稿, 向机械工业出版社推荐, 仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色:

本系列图书属专题论著性质, 选题新颖, 力求反映电力电子技术的新成就和新经验, 以适应我国经济迅速发展的需要。

理论联系实际, 以应用技术为主。

本系列图书组稿和评审过程严格, 作者都是在电力电子技术第一线工作的专

家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

## 电力电子新技术系列图书 编辑委员会

# 前 言

经过半个多世纪的发展，无功补偿已从最原始的手动刀闸控制或固定式辅助电力设施发展成高度集成化、智能化、网络化和高速化的现代高科技领域，许多智能控制技术和通信技术得到了充分的体现。尽管已有大量的研究论文和一些书籍讨论无功补偿的控制及其优化，但一般只是停留在局部概念之上，或者只是纯理论性的内容，对具体实践的指导则很少涉及。随着电力系统的快速发展，特别是最近 20 多年来大量基于智能型的无功补偿设备不断涌现，无功补偿领域已发生了根本性的变化，特别是新技术、新原理的运用使无功补偿的控制目标从简单的单一目标发展为多目标的综合控制体。本书从理论到实际全面介绍了输电和配电系统中无功补偿的理论、应用、结构与控制，并通过应用举例阐述了相关的补偿特性，从而使读者能对无功补偿有一个较为具体的认识。

随着智能电网的快速发展，以及电网容量的不断扩大，国家对电能质量的要求也越来越高，电能质量对电气设备的影响逐步引起有关技术人员的重视，使得越来越多的电气工作者希望迅速理解和解决本单位或本部门的电能质量问题。无功补偿是改善和提高电能质量的重要手段之一，但如何结合本单位或本地区的实际设计一个改善电能质量的方案又不是一个简单的事情。本书的出发点是，首先能够用简单明了的常识引申出无功补偿的概念，然后逐一介绍无功的理论定义和系统模型参数，在此过程中通过典型范例的求解过程使读者能快速理解无功的作用和实现补偿控制的一般方法，而这种方法的基础只需具有基本电路的常识即可读懂。在此基础上，然后再逐一介绍无功补偿的其他作用与实现原理、控制方法等。可以说，本书的特点是浅显易懂，但又不失应有的深度。

本书的第 1 章首先介绍了无功功率的基本概念、基本计算方法、架空线、电缆、负载无功变化对端电压的影响、复杂网络无功补偿的基本方法、输电网潮流及其稳定性的概念、常用无功补偿设备、无功补偿发展的特点以及远程智能终端等内容，同时还对无功补偿中常用的晶闸管触发的可靠性和具体的设计原则进行了说明。通过对这一章的内容学习，并掌握了相关概念和理论，就应该具有从事无功补偿设计的基础。

在此基础上，第 2 章阐述了并联型无功补偿，它是实用无功补偿的重要形式之一，配电网中的无功补偿基本上都是采用这种形式。本章从并联补偿的现状出发，介绍了线路中点补偿设计原理，对轻载条件下的无功补偿以及相关特性、控制进行了详细说明，并阐述了轻载条件下系统功率因数与负载功率因数之间的

关系及无功补偿的解决思路。此外，针对新产品的出现，特别对 STATCOM 和 MCR 进行了分析，介绍了控制系统的一般设计结构和控制原则。考虑到配电网的经济性和灵活性需求，本章还介绍了 TSC 的小型化设计原理，比较了不同无功补偿设备之间的特性。

为保证长距离输电线路的传输容量、增强输电系统的稳定性，第 3 章专门介绍了串联无功补偿的原理、方法以及对稳定性的影响，对普遍使用的门极关断 (GTO) 晶闸管控制的串联电容 (GCSC)、晶闸管投切串联电容 (TSSC)、晶闸管控制的串联电容 (TCSC)、静止同步串联补偿器 (SSSC) 的原理，以及它们的控制、损耗、性能等进行了推导和说明；讨论了串联补偿可能出现的次同步谐振及其抑制方法。

除了功率因数提高、传输容量增加、系统稳定、抑制振荡外，电力系统中的谐波也是电能质量的重要内容之一。本书的第 4 章从谐波的概念与产生出发，介绍了电力滤波器的实现原理及其无功补偿，对涉及谐波的专有名词、国内外对于谐波的相关标准等都进行了完整的介绍。其中对无源和有源滤波器、串联和并联滤波器、并联混合型滤波器结构，以及它们的控制原理和实现方法，均进行了详细阐述，同时也给出了仿真分析计算和试验波形，以便读者进行对比分析。在本章的最后，根据导出的交流电阻计算公式，还专门推导了谐波损耗、趋肤效应所产生的附加损耗的理论计算公式。

电力系统的电能质量还涉及三相交流系统的对称性质量。第 5 章首先介绍了不对称系统的基本概念和衡量标准，对三相三线制和三相四线制的平衡补偿分别进行了说明，阐述了并联型和串联型以及串并混合型的平衡补偿原理与设计方法。在介绍常规平衡补偿技术过程中推导并分析了三角形平衡补偿和星形平衡补偿的平衡计算表达式；而在讨论串并混合型的设计时，通过二极管整流的准 UP-FC 和完全 UPFC 的平衡补偿结构，用实例进行了分析和计算，同时还举例说明了不对称系统的附加损耗。

为了保证电力系统的稳定和潮流的合理分布，除了采用前面各章所介绍的各种补偿控制技术外，采用变压器有载调压也是解决问题的方法之一。这其中不仅涉及幅值的调整，也可以进行相位变化，使变压器的抽头调节不仅具有调压能力，而且还具有相位调节功能。第 6 章则针对这两种方式进行了专门分析。这两种控制方式的实现均采用晶闸管来控制，它们是通常所说的晶闸管控制的电压调节器 (TCVR) 和相角调节器 (TCPAR)。为更好地使用电压和相角调节器，本章还分析了两者的稳定性问题，同时还介绍了混合型相角调节器的概念和结构。

为了对全书所有内容进行全面总结，同时也反映现代电力系统发展的最新模型和概念，并结合调度自动化中的管理架构，本书的最后一章介绍了区域电网无功补偿的作用和管理模式，并对其中的自动电压控制 (AVC) 和电压无功控制



(VQC)进行了非常详细的阐述,尽可能地介绍其中待解决的问题以及发展趋势。在控制系统部分,不仅介绍了常规的计算原理和实现方法,同时还介绍了已投入或推荐使用的控制策略,其中有些控制策略可能还仅仅是一种思路。尽管如此,本章的内容都是在保证原理正确、具有成熟技术成果支撑,且代表了先进性和可行性基础之上的一种阐述。

为了便于教师选用本书作为教材,本书专门配套有电子课件及习题解答,凡一次性购买本书30册以上当作教材使用的授课教师,均可凭据通过电子邮箱 [butzjh@163.com](mailto:butzjh@163.com) 与我们联系索取上述文件,经核实后我们会将文件发送给您。

作为我本人从事电气工程领域的教学和研究30年的一个总结,本书内容力求完整、文字精炼、通俗易懂,且反映了无功补偿领域的发展现状及趋势。在本书的编写过程中,得到了同事、家人、朋友和研究生们的大力支持和帮助,作者对他们的无私奉献和付出表示由衷的敬佩和深深的感激。其中,吕红负责制作了全书的PPT文档;彭湃对7.2~7.5节的内容进行了认真而又负责的整理和归纳,并编写了第7章课后习题及参考答案,同时也对其余各章的习题给出了适当的建议;余音负责编写了本书中第2章和第5章的课后习题,并与彭洁锋、钟榜、阳海彪一起完成这两章习题的相应答案,同时还与方伟明和李勇一起参与了第5章例题的仿真编程和分析计算;方伟明对于第5章的课后习题提出了一定的修改意见;李蕾负责完成了本书第1章和第4章的课后习题,并完成这两章习题的相应解答。

本书不仅能作为本科生、研究生的毕业论文或设计的参考书,还能为电气工程技术人员提供一般的无功补偿设计方法。因此,本书的读者可以是所有从事电气工程的技术人员,这除了直接从事电力系统的工程技术人员外,还包括各单位的电工和电力设计人员以及院校高年级的本科生和研究生。如果本书能够给读者带来专业或事业上的帮助,并能利用书中所介绍的知识推动本部门或行业内的技术进步、产品质量的改进,作者将会感到不胜荣幸和欣慰。

由于本书所涉及的内容较为广泛,作者的理解深度以及所接触到的实际应用和发展现状毕竟有限,虽经作者反复推敲,书中难免仍存在不足和瑕疵,恳请读者见谅,并请读者不吝赐教。

作者于广州

# 目 录

## 电力电子新技术系列图书序言

## 前言

## 第 1 章 无功补偿的基本概念 ..... 1

- 1.1 什么是无功功率 ..... 1
- 1.2 为什么要进行无功补偿 ..... 2
- 1.3 传输线路的等效模型 ..... 4
  - 1.3.1 架空线等效模型参数计算 ..... 4
  - 1.3.2 电缆传输线等效模型参数计算 ..... 11
- 1.4 无功功率的计算 ..... 23
  - 1.4.1 系统分析中的几个概念 ..... 23
  - 1.4.2 系统分析的模型等效 ..... 24
  - 1.4.3 无功计算的基本方法 ..... 25
  - 1.4.4 复杂系统的无功补偿 ..... 32
- 1.5 输电网互联的潮流及其稳定性概念 ..... 34
  - 1.5.1 电网互联的简化模型 ..... 35
  - 1.5.2 传输线的潮流计算 ..... 36
  - 1.5.3 稳定性的基本概念 ..... 38
- 1.6 常用无功补偿设备 ..... 40
  - 1.6.1 固定电容 ..... 40
  - 1.6.2 机械旋转类无功补偿 ..... 40
  - 1.6.3 静止类无功补偿器 ..... 44
  - 1.6.4 复合类无功补偿器 ..... 47
- 1.7 晶闸管触发的可靠性 ..... 48
- 1.8 无功补偿发展的特点 ..... 52
  - 1.8.1 多功能化 ..... 53
  - 1.8.2 集成化 ..... 54
  - 1.8.3 综合化 ..... 56
  - 1.8.4 自愈性 ..... 56
  - 1.8.5 智能终端 ..... 58

1.8.6 网络化 ..... 62

1.8.7 发展趋势 ..... 67

复习思考题 ..... 72

## 第 2 章 并联型无功补偿 ..... 75

- 2.1 并联补偿的现状及其说明 ..... 76
- 2.2 并联补偿器的基本原理 ..... 78
  - 2.2.1 传输线中点的无功补偿 ..... 79
  - 2.2.2 线路终端电压的支撑 ..... 84
  - 2.2.3 配电线路轻载条件下的无功补偿 ..... 90
- 2.3 静止同步补偿器 ..... 95
  - 2.3.1 STATCOM 简介 ..... 96
  - 2.3.2 STATCOM 的基本工作原理 ..... 98
  - 2.3.3 STATCOM 的损耗和谐波 ..... 104
  - 2.3.4 基本控制方法 ..... 106
- 2.4 磁控电抗器 ..... 112
  - 2.4.1 基本概念 ..... 114
  - 2.4.2 磁控电抗器的基本原理和结构 ..... 115
  - 2.4.3 裂心磁路的磁特性 ..... 118
  - 2.4.4 绕组的换流 ..... 123
  - 2.4.5 磁阀式电抗器的电磁关系 ..... 128
  - 2.4.6 基于神经网络的偏磁特性拟合方法 ..... 134
  - 2.4.7 MCR 的控制 ..... 144
- 2.5 晶闸管控制电抗器与晶闸管投切电抗器 ..... 146
  - 2.5.1 晶闸管控制和晶闸管投切电抗器 (TCR 和 TSR) ..... 146

2.5.2	TCR 的等效电抗	149	基本运行控制	220
2.5.3	TCR 的谐波	150	3.3 开关型变流器构成的串联	
2.5.4	TCR 与 MCR 的比较	156	补偿器	223
2.6	晶闸管投切电容	160	3.3.1 静止同步串联补偿器	224
2.6.1	晶闸管投切电容的一般		3.3.2 SSSC 的传输特性	225
发展概况		160	3.3.3 控制范围与额定容量	228
2.6.2	单相 TSC 的工作特性	162	3.3.4 提供有功补偿的能力	229
2.6.3	三相 TSC 的投切原理	167	3.3.5 次同步谐振的消除	233
2.6.4	TSC 的 $U-I$ 特性	170	3.3.6 SSSC 的内部控制	235
2.7	复合型无功补偿系统	171	3.4 串联无功补偿器的外环控制	
2.7.1	固定电容器与 MCR 或 TCR		系统	238
构成的无功补偿器		172	3.5 SSSC 的性能和特征归纳	240
2.7.2	TSC 与 TCR 组成的复合型		复习思考题	241
无功补偿器		177		
2.7.3	STATCOM 与 TSC 和 TCR			
构成的无功补偿系统		183	<b>第 4 章 电力滤波器及其无功</b>	
2.7.4	无功补偿器的基本特性	185	<b>补偿</b>	248
2.7.5	混合补偿器的优点	186	4.1 谐波及其衡量标准	248
2.8	静止无功系统	187	4.1.1 什么是谐波	248
复习思考题		188	4.1.2 谐波限制及其相关标准	251
			4.1.3 相关的基本概念	254
			4.2 抑制谐波的基本原理	260
			4.2.1 滤波器的分类	260
			4.2.2 电力滤波器的基本概念	261
			4.2.3 电力滤波器的控制策略	262
			4.3 无源滤波器及其无功补偿	266
			4.3.1 无源滤波器的设计	266
			4.3.2 无源滤波器的无功补偿	267
			4.4 并联型电力有源滤波器	269
			4.4.1 实现并联有源滤波的	
			机理	270
			4.4.2 控制原理	271
			4.4.3 APF 仿真的数值计算	276
			4.4.4 动态特性的改善	281
			4.5 串联型电力有源滤波器	286
			4.5.1 串联滤波的基本概念	286
			4.5.2 串联滤波的基本原理	289
			4.6 并联混合型滤波器	290
			4.6.1 SHF 的一般设计方法	290
<b>第 3 章 串联补偿</b>		192		
3.1 串联补偿的目的		192		
3.1.1 串联电容补偿的概念		193		
3.1.2 电压稳定性		194		
3.1.3 暂态稳定性的改善		195		
3.1.4 功率振荡的阻尼		196		
3.1.5 次同步振荡的阻尼		198		
3.1.6 串联补偿的功能及要求		198		
3.1.7 可控串联补偿的实现				
方法		199		
3.2 可变阻抗型串联补偿器		200		
3.2.1 门极关断晶闸管控制的				
串联电容		200		
3.2.2 晶闸管投切串联电容		207		
3.2.3 晶闸管控制串联电容		209		
3.2.4 次同步特性		217		
3.2.5 GCSC、TSSC 和 TCSC 的				

4.6.2	控制系统的描述	292
4.6.3	性能优化的进一步考虑	296
4.7	谐波损耗	297
4.7.1	谐波损耗的计算	297
4.7.2	附加谐波损耗	304
	复习思考题	309
<b>第5章 不对称系统的平衡补偿</b>		
	补偿	312
5.1	不对称系统的一般概念	312
5.2	不对称系统的电抗型平衡补偿模型	318
5.2.1	三相四线制的不对称平衡补偿	319
5.2.2	三相三线制不对称系统的平衡补偿	325
5.2.3	平衡补偿的一般性模型	335
5.2.4	平衡补偿的数值逼近算法	341
5.2.5	平衡补偿控制的PQ计算模型	348
5.2.6	平衡补偿控制系统	349
5.3	串联型平衡补偿	352
5.4	不对称系统的UPFC平衡补偿	356
5.4.1	UPFC实现平衡补偿的原理	357
5.4.2	变流器的交直流运行特性	359
5.4.3	基于完整的UPFC平衡补偿控制	367
5.5	不对称系统的附加损耗	369
5.5.1	不对称系统附加损耗的相关概念	369
5.5.2	附加损耗计算	371
5.5.3	应用举例	372
	复习思考题	373
<b>第6章 变压器的调压与相移</b>		
6.1	静止电压、相角调节器的作用	376
6.1.1	电压和相角调节器的相关概念	376
6.1.2	相角调节器对潮流控制的影响	378
6.1.3	有功和无功环路潮流的控制	381
6.1.4	利用相角调节器改善暂态稳定性	383
6.1.5	相角调节器对功率振荡的阻尼	384
6.1.6	相角调节器的功能要求	385
6.2	晶闸管控制的电压和相角调节器	385
6.2.1	连续型可控晶闸管控制的抽头调节器	388
6.2.2	离散电压等级的晶闸管抽头调节器	394
6.2.3	晶闸管抽头调节器中开关阀额定值的考虑	396
6.3	开关型电压和相角调节器	397
6.4	混合型相角调节器	399
	复习思考题	400
<b>第7章 区域电网的无功补偿</b>		
7.1	电网互联的无功补偿	404
7.1.1	区域无功补偿的特点	404
7.1.2	无功补偿与区域电网控制之间的相关概念	406
7.1.3	区域电网的基本控制目标	409
7.1.4	区域无功补偿的发展趋势	411
7.2	VQC的基本理论	414
7.2.1	电网的潮流计算	414
7.2.2	电压稳定性	417

7.2.3 区域无功优化的约束条件 ..... 419

7.2.4 辐射网络补偿特性 ..... 420

7.3 VQC 的控制策略 ..... 422

7.3.1 VQC 的一般控制方法 ..... 422

7.3.2 九区图控制 ..... 425

7.3.3 改进的九区图控制 ..... 428

7.3.4 VQC 的控制目标 ..... 433

7.3.5 综合设计的基本原则 ..... 434

7.4 基于模糊控制的变电站电压无功综合控制 ..... 439

7.4.1 模糊控制系统概述 ..... 439

7.4.2 变电站电压无功综合控制

策略 ..... 441

7.4.3 基于模糊控制的电压无功综合控制 ..... 443

7.5 自动电压控制系统 ..... 445

7.5.1 AVC 的基本架构 ..... 446

7.5.2 AVC 的控制模式 ..... 447

7.5.3 三级控制策略 ..... 447

7.5.4 全网电力系统控制的发展 ..... 449

复习思考题 ..... 449

**参考文献** ..... 452

# 第1章 无功补偿的基本概念

世间万物的变化无一不受其客观物理规律的制约。“电”作为一种客观的物理现象，它也必须遵循相应的客观规律。自从1752年富兰克林发现了“天电”现象，并在其后262年的时间里，人类对于“电”的研究已经取得了长足的发展。最初的“电网络”实际上就相当于富兰克林当年用于“捕捉天电”的风筝的金属导线，当然，现在所指的电网络比起那时一根金属导线形成的“网络”要复杂多了。只要电网络中存在电位差，就会在网络中形成电流，也可称之为“潮流”，在当今电力系统中，“潮流”这个术语一般用于描述线路中有功和无功的大小。如同空气能均匀布满整个空间的特性一样，电网络潮流也充斥了整个电网。人们通常将电网比作水网，根据河道的宽窄、河床深浅、落差高低、出口大小、水质粘性、悬浮和漂浮物的体积，以及这些悬浮和漂浮物的密度等因素的不同，对水流形成的阻力大小也不同，在不同的地域或区间还会形成旋涡和回流；与此对应，电网络潮流的大小则与承载电子流路径的导电材质粗细、横截面形状、电位差、负载大小、电导率、导电材质的均匀性等因素有关，而无功功率则相当于水网中的旋涡和回流。

## 1.1 什么是无功功率

在日常生活中，人们对于“有功功率”很容易理解，因为它能做功、产生热量、带动电机旋转等。例如，当交流电通过纯电阻的时候，电流能使电阻发热，即电能可转换成热能，是实实在在能感觉得到的能量。但“无功功率”一般则难于理解，它仅存在于交流电中，直流电不存在无功功率问题。例如，当交流电流通过纯电容或纯电感负载时并不做功，也就是说纯电容或纯电感不消耗有功功率，但在它们中流过的电流以及对应电压就形成了交流功率，这种交流功率即称为无功功率。理论上讲，无功功率是不做功的，当然它也不应该产生光和热，更不能带动电机的旋转。当然实际负载不可能为纯容性负载或者纯感性负载，一般都是混合性负载，这样电流在通过它们的时候，有部分功率能做功，有部分功率不能做功。不能做功的部分就是无功功率，此时常称“负载功率因数小于1”，并以功率因数的概念来表达电能的利用率。为了提高电能的利用率，就要进行无功补偿。

既然无功功率不能做功，是不是可以不需要它呢？在实际应用中，很多电气

设备离开了无功功率是不能正常或完全不能工作的。例如，任何一个用电终端似乎只需要实实在在的有功功率，但要将电能传输到各用户，就必须首先将电压降低到用户所需要的电压等级，由此就需要应用降压变压器，并经过该变压器将电能传输给千家万户。然而，根据变压器的工作原理可知，变压器的二次绕组之所以能够感应出用户所需要的电压等级，就是由于二次绕组所包围着的铁心中具有交变磁场，也正是由于这个交变磁场的存在才能够在变压器的二次绕组中产生电压，并完成电能的传输，而这个交变磁场的形成就是通过一次绕组中的励磁电流所产生的，这部分功率并没有做功，建立这个交变磁场所需的励磁电流以及对应的励磁功率因为没有做功则称为无功功率；类似的，交流电动机之所以能够旋转就是因为有了旋转磁场（由励磁电流形成）才能带动转子转动，从而达到做功的目的。在电力整流器中，由于晶闸管控制角的存在，使得交流线路中基波电流相位与所施加的电压相位之间产生了一个相位差，因而它也相当于吸收了无功功率。至于其他凡是吸收无功功率的电气设备，也都具有自身工作需要的机理或原因。

显然，无功功率的存在是众多电气设备正常工作的需要，也是必备要求，它反映了负载特性，以后还会知道，无功功率的分布和大小变化也会影响电压的稳定。此外，负载所需无功功率的大小则会根据电气设备的运行条件、环境参数、网络结构、材质特性、负载大小等因素所决定。由于电网络实际上是给许许多多电气设备提供电能的通道，而电气设备的特性又各不相同，因此，电网络中无功功率的大小是波动的，且随机性很强，但它的存在“挤占”了电网络给负载提供有功功率的资源，应科学、合理地进行适当的补偿。

## 1.2 为什么要进行无功补偿

无功功率的需求是负载特性所决定的，但它占用了网络能量传输的资源。在三相完全对称的条件下，三相传输线的传输容量  $S_e$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$ 、线电压  $U_L$ 、线电流  $I_L$  以及功率因数  $\cos\varphi$  之间的对应关系可表示为

$$S_e^2 = P^2 + Q^2 \quad (1.1)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cos\varphi \quad (1.2)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \sin\varphi \quad (1.3)$$

式中， $\varphi$  为三相负载上电压与电流之间的相位差，也称为功率因数角。例如，某一三相传输线路的额定电压  $U_L$  为 110kV，额定电流  $I_L$  为 100A，即额定传输容量  $S_e$  为 19.052MVA。若该条线路的无功传输容量  $Q$  分别为 5Mvar 和 8Mvar 时，则根据式 (1.1) 知，在保持额定传输容量和电压不变的前提下，该线路实际提供

的有功功率则分别约为  $P = 18.38\text{MW}$  和  $17.29\text{MW}$ 。显然，随着无功功率的增加，所能传输的有功功率就越小。由于有功功率是真正实际做功的分量，那是不是说为了增加有功功率的传输，应该尽可能或者全部消除无功功率？或者干脆不给负载无功功率呢？

前已述及，无功需求是负载或传输线本身的特性所决定的，也是负载正常工作所必需的，否则也不可能吸收有功功率。那么有没有一种系统的解决方法能够保证传输线的容量全部都用于传输有功功率，但同时又能保证负载所需的无功功率呢？答案是肯定的，那就是采用“无功补偿”技术。所谓“无功补偿”，就是利用某种设备或装置提供负载所需的无功功率，而不是由传输线来提供，这样就能使传输线能最大限度地传输有功功率，还能减少无功电流分量在线路上的损耗。要解决这个问题只需将这种无功补偿设备安放在负载旁边，就能达到这个目的。有时，也将这种提供无功功率的设备或装置也称之为“无功电源”。从纯理论的角度来讲，无功电源由于不需要提供有功功率，因而也不需要原动机，也免除了发电设备、锅炉、煤或其他燃料，占地面积可大大缩小。由于无功电源的作用就是提供或吸收无功功率，似乎只要利用电容或电感就能满足补偿要求，但作为“电源”还有一个要求就是要保证电压的稳定性。最常用的无功补偿器件一般为电容或是电感，前者向系统提供无功功率，后者则从系统吸收无功功率，但这两种器件所能发出或吸收的无功功率与器件本身所承受的电压二次方成正比，其具体表达式为

$$\left. \begin{aligned} Q_C &= \omega C \cdot U_C^2 \\ Q_L &= U_L^2 / (\omega L) \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

式中， $\omega (= 2\pi f)$  为系统运行的角频率，单位为弧度/秒 (rad/s)； $f$  为电源频率，单位为赫兹 (Hz)。显然，这两种器件所产生或吸收的无功功率与电压的波动有很大的关系，它们都不具有稳压的能力。严格来讲，它们也都不能称之为“无功电源”，但当它们与智能控制系统相结合、且采用恒压控制策略时，才能成为真正意义上的无功电源。如以后将介绍的 STATCOM、SVG 等在恒压控制策略下就属于无功电源的范畴，它们实际上就是将电容或电感与各种电力电子及其他开关器件结合在一起实施综合控制的结果，但在那种条件下所发出或吸收的无功功率则不能用式 (1.4) 来进行描述。在电力系统中，通常将“电感”称之为“电抗器”，以后若无特殊说明，本书将用“电抗器”来代表电感。

事实上，“恒压控制策略”本身就包含有“稳定器件端电压”的能力，也就是说，无功补偿不仅具有功率因数补偿的作用，而且还具有稳定电压的作用。以后还会看到，在输电系统中无功补偿还具有抑制系统功率振荡的作用。从某种意义上讲，无功补偿已经从过去单纯提高电力线路传输容量、减少线路损耗的功



能，发展成为维护和提高电力系统稳定性的重要手段或工具。

## 1.3 传输线路的等效模型

### 1.3.1 架空线等效模型参数计算

#### 1. 单导线的阻抗计算

导线电阻的计算是根据导线材质物理尺寸和电阻率来确定的，其直流电阻的基本计算公式为

$$r = \rho / S \quad (1.5)$$

式中， $\rho$  为导线材质的电阻率； $S$  为导线的横截面积。

在工频交流电的作用下，由于存在趋肤效应和邻近效应，其交流电阻值比直流电阻值略大一些，若存在谐波时则会更大一些；此外，实际导线为多股绞线扭绞而成，因而应用多股胶线的情况下实际长度应增加 3% 左右。厂家给出的单位长度电阻往往是 20℃ 条件下的值  $r_{20}$ ，若导线温度系数为  $\alpha$  时（其值可在手册中查到），在其他温度  $T$  时的值可表示为

$$r_c = r_{20} \cdot [1 + \alpha(T - 20)] \quad (1.6)$$

#### 2. 单根架空线的电感

如图 1.1 所示，设某一单根圆形导线横截面半径为  $r$ ，导线通过的电流幅值为  $I$ 。根据安培环路定律知，当导线中有电流通过时，便会在其周边产生如图 1.1b 所示的环形磁场，该环形磁场所形成的总磁通量  $\Phi$  除以该环形磁场所包围的电流则为环形磁场所包围的导线部分电感  $L$ 。

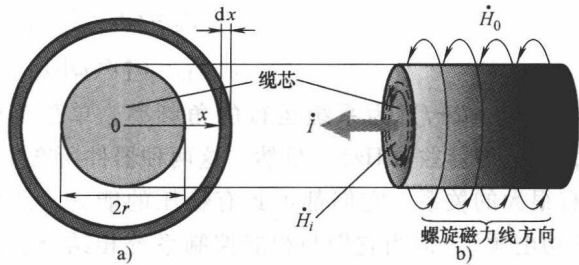


图 1.1 单根导线电流、螺旋磁场方向及其耦合示意

根据以上概念，磁场对

导线所形成的电感就包含两部分：一部分处于导线内部，另一部分则处于导线的外部。设电流  $I$  在导线横截面上均匀分布，因此，在求解半径为  $x$  ( $x > r$ ) 的时候，可认为半径为  $x$  的圆形面积中包含的电流  $I_i = I \times (\pi x^2 / \pi r^2) = I / (x/r)^2$ ，同时还由于磁场强度矢量  $\vec{H}_i$  与圆弧切线方向的增量  $d\vec{g}$  总是保持一致，因此有

$$\oint \vec{H}_i \cdot d\vec{g} = I_i \frac{x^2}{r^2}$$

上述表达式的左边等于  $2\pi x \times H_i$ ，所以