



DIANNENG ZHILIANG ZHILI HE
GAOXIAOYONGNENG JISHU YU ZHUANGBEI

罗 安 编著

电能质量治理和 高效用能技术与装备



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

著 者 内 容

电能质量治理和 高效用能技术与装备

罗 安 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书结合电力节能工程的应用需求,围绕谐波、无功和负序等电能质量治理技术,兼顾电能变换技术,由浅入深地阐述了电能质量治理技术和高效整流技术的原理、方法与实现,将电能质量与电力节能技术进行有机结合,为从事电能质量与电气节能技术的工作者提供理论与技术参考。

本书可供从事工程设计的设计人员使用,还可供从事电气工程、控制工程及相关领域的工程技术和管理人员学习,可作为研究生的学习、参考用书,也可作为电气工程专业本科生和专业培训班的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电能质量治理和高效用能技术与装备/罗安编著. —北京:
中国电力出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-5123-5518-7

I. ①电… II. ①罗… III. ①电能-质量管理②电能-节能
IV. ①TM60②TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 024443 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 10 月第一版 2014 年 10 月北京第一次印刷

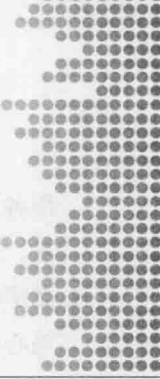
787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 381 千字

印数 0001—2000 册 定价 66.00 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



前言

电力节能是我国社会和经济发展的一个重大战略问题,是推动“节能减排”国家政策方针的一个重要手段。当前我国在电力节能减排方面已取得明显成效,但电能利用效率与发达国家相比,仍有明显差距。据统计,我国单位 GDP 电耗是世界平均水平的 3.34 倍,能源利用效率比发达国家落后约 20 年。而无功、谐波、负序等电能质量问题及电能利用率低是造成配电网电能损失的突出原因。因此,进行电能质量治理,提高电能变换效率,进行用电能效评估和管理节能具有十分重要的实际意义。

笔者从事电能质量及高效用能技术与推广应用工作已二十多年,先后完成了国家自然科学基金、国家 863 计划、国家科技支撑计划、湖南省重大科技专项等课题。在国内外高层次期刊发表相关论文 200 余篇,取得了较为丰富的理论成果,并成功将研究成果应用到工业企业,获得了显著的应用效果。本书围绕工业企业配电网急需的电能质量治理与高效用能技术,结合笔者在该领域多年的研究及应用成果,从无功、谐波、负序等电能质量治理技术入手,对高低压配电网的谐波抑制技术、无功补偿技术、谐波与无功综合补偿技术、负序抑制技术、电力电子能量变换技术等展开讨论,既有有源电力滤波器、静止无功补偿器、先进静止无功发生器等经典电能质量治理技术的阐述,又有谐波和无功综合动态补偿技术、高频开关电源技术、电气化铁路牵引综合补偿技术等新成果的介绍。全书力求理论联系实际,在阐述理论和技术的同时,结合工程应用需求介绍装备研制技术,其目的是推动我国电能质量治理和电气节能技术的深入研究、工程应用的普及和发展。

本书的主要特色表现在:

(1) 系统介绍了当今主流的电能质量治理技术,包括有源电力滤波器、混合型有源电力滤波器、智能型无功补偿器、静止无功补偿器、先进静止无功发生器等在工业中应用的各种补偿装置的原理和技术;同时,还介绍了基于 PWM 整流技术的高频开关电源,实现了高功率因数和低谐波含量的 AC/DC 整流。

(2) 本书针对工程应用,将理论和实际相结合,介绍了多种补偿装置的研制技术与实现方法,为相关电力节能产品的开发提供了实践参考。

(3) 书中介绍了笔者最新的研究成果,主要有有源电力滤波器与静止无功补偿器联合补偿系统、静止无功发生器与晶闸管控制电容器构成的混杂无功补偿器、电气化铁路牵引综合补偿技术等内容。

本书的出版得到了国家科学技术学术著作出版基金的大力支持。本书的完成得益于作者研究团队的共同努力，其中帅智康、吴传平、马伏军、王文、黎燕、肖华根、陈燕东、熊桥坡等博士为本书做了扎实的前期工作，曾灿林、王晓、孙娟硕士进行了本书的文字检查和排版工作。此外，还得到了湖南大学电气与信息工程学院的同事以及家人的关心和鼓励，在此一并表示感谢！

由于作者的学识水平和时间有限，书中难免有疏漏和不完善之处，敬请广大读者批评指正。

罗 安

目录

前言

1 概述

- 1.1 电能质量的定义及电能质量治理的意义 1
- 1.2 电能质量控制技术的发展现状 2

2 低压智能无功补偿技术与实现

- 2.1 无功补偿的原理和意义 5
- 2.2 低压无功补偿装置 8
- 2.3 无触点低压智能无功补偿装置技术与实现 9

3 配电网静止同步无功补偿器控制技术与实现

- 3.1 DSTATCOM 的工作原理与数学模型 20
- 3.2 DSTATCOM 的检测与控制技术 23
- 3.3 DSTATCOM 的仿真试验分析 39
- 3.4 DSTATCOM 的装置实现与模拟实验 41

4 低压无功补偿混杂控制技术

- 4.1 HVC 的基本结构、电气模型与工作原理 47
- 4.2 HVC 专家协同混杂控制方法 50
- 4.3 仿真与实验 55

5 低压有源滤波控制技术及其工程应用

- 5.1 低压有源滤波器的原理和系统结构 60
- 5.2 低压并联型有源滤波器的控制系统 63
- 5.3 低压并联型有源电力滤波器的工程应用 76

6 低压大电流高频开关整流电源技术

- 6.1 三相整流器的拓扑结构及工作原理 95
- 6.2 基于单相全桥逆变器的 DC/DC 变换器的拓扑结构及控制策略 101
- 6.3 高效节能型高频开关电源技术 103

6.4 高频开关电源的自均流并联控制技术的研究	116
6.5 高频开关电源的工程设计	120

7 高压静止无功补偿器技术与实现

7.1 高压 SVC 类型与原理	130
7.2 高压 SVC 整体设计	132
7.3 硬件和软件实现技术	136
7.4 试验研究	160

8 级联型高压静止无功发生器技术与实现

8.1 高压 SVG 的主电路拓扑	165
8.2 级联型 SVG 控制系统研究	166
8.3 级联型 SVG 实验样机的研制与实验研究	171

9 适用于中高压系统的注入式混合型有源电力滤波器及其直流侧电压控制技术

9.1 IHAPF 的基本结构及原理	185
9.2 IHAPF 直流侧电压抬升机理分析	186
9.3 IHAPF 直流侧过电压抑制方法研究	195
9.4 仿真结果	203

10 无功与谐波动态混合控制技术

10.1 高效无功与谐波混合控制系统的必要性及意义	205
10.2 高效无功与谐波混合控制器的基本原理	206
10.3 高效无功与谐波混合控制系统复合控制方法研究	210
10.4 仿真及实验结果	218

11 电气化铁路牵引供电网综合补偿技术

11.1 电气化铁路电能质量问题及其治理技术现状	224
11.2 基于 Scott 变压器的电气化铁路电能质量治理方法	230
11.3 基于 V/v 变压器的电气化铁路电能质量补偿方法	241

参考文献	252
------------	-----

索引	254
----------	-----

概 述

随着资源紧缺、环境污染的不断加剧,节能减排成为全球重点关注的问题。电能虽然是二次能源,但其主要由一次能源(电煤)转化产生,电能的消耗直接导致一次能源的减少。电力可持续发展已成为实现社会经济可持续发展的基础,并在社会经济、能源与环境协调发展中起着重要的平衡作用。在企业配电网中,电能质量问题和电能利用效率低导致电能损失严重。目前,我国多数行业的电耗水平都高于发达国家,制约着我国经济发展方式由高能耗、高污染向经济高效方式的转变,因此,进行电能质量治理、提高电能利用效率对经济社会发展具有重要的意义。

近年来,随着电力电子技术的发展和广泛应用,配电网中的整流器、变频器、电气化铁路等非线性负载大量增加,引起电网电流、电压波形发生畸变,造成电网的谐波污染和电能损失。同时,冲击性负载及无功补偿不足常引起电网电压跌落和闪变,影响企业的正常生产和人民的日常生活,并导致线路损耗大大增加,造成了电能浪费严重。同时,电能质量问题影响电网安全稳定运行,由电能质量问题引发的电网大面积停电事故时有发生,造成了经济损失和不良的社会影响。为解决日趋严重的电能质量问题,各种电能质量控制技术应运而生,并取得了一定的治理效果。随着安全可靠、清洁高效的智能电网的建设,我国对提高电能质量、净化电网、提高电能利用效率的要求也日趋提高。

1.1 电能质量的定义及电能质量治理的意义

1.1.1 电能质量的定义

国内外对电能质量确切的定义至今尚没有形成统一的共识,但大多数专家认为,电能质量的定义应理解为:导致用户电力设备不能正常工作的电压、电流或频率偏差,造成用电设备故障或误动作的任何电力问题都是电能质量问题^[1]。IEC 标准对电能质量的定义为:电能质量是指供电装置在正常工作情况下不中断和干扰用户使用电力的物理特征。IEEE 协调委员会对电能质量(power quality)的技术定义为:合格的电能质量是指敏感设备提供的电力和设置的接地系统均是适合该设备正常工作的^[2]。

围绕电能质量的含义,从不同的角度理解电能质量通常包括电压质量、电流质量、供电质量、用电质量四个方面,其中最重要的是电压质量和电流质量。电压质量是指实际电压与理想电压的偏差,反映供电企业向用户供应的电能是否合格,这个定义包括了

大多数电能质量问题,比如电压暂降、电压突升、稳态和暂态电压扰动等,但它不包括频率造成的电能质量问题,也不包括用电设备对电网电能质量的影响和污染;电流质量反映了与电压质量有密切关系的电流变化,电力用户除对交流电源有恒定频率、正弦波形的要求外,有些用户还要求电流波形与供电电压波形同相位以保证高功率因数运行,而影响电流质量的主要原因是谐波、间谐波,大部分由非线性元件产生,对电力系统而言是一种电磁环境污染。这就要求电力系统、电能变换系统必须提高电能变换质量和效率。另外,干净的电磁环境也要求电能变换设备在电磁兼容性方面达标,实现节约电能、电磁兼容、无环境污染的绿色供电。

一方面,电能质量反映了电能的利用效率和经济性,例如谐波和无功影响输配电线路损、影响输配电设备的损耗甚至导致设备故障;另一方面,电能利用效率还与电力设备终端的利用效率有关,包括单个电力设备的电能利用效率,还包括一定范围内配电系统的整体电能利用效率。因此,进行电能质量治理不仅可以节能降耗,还可以提高电能质量,相应地提高了电力系统供电可靠性,避免严重电力事故的发生,保障电力用户的正常生产和生活用电。

1.1.2 电能质量治理的意义

谐波、无功、电压波动与闪变、三相不平衡给电力系统输配电设备带来较大危害,并影响电力系统的安全、经济和稳定运行。谐波的危害主要表现在增加变压器和线路损耗,使继电保护装置动作引发停电事故,引起谐波放大损坏电力设备,干扰通信,影响计量准确等;无功功率补偿不足将造成输配电线路损耗增加,影响输配电线路电压水平;三相不平衡会带来降低变压器出力、使继电保护装置误动、引起发电机转子过热等危害。因此,通过电能质量治理技术,控制这些电能质量指标在可接受范围内,以减轻或消除这些不利影响,对提高电能利用效率和安全稳定供电,具有十分重要的意义。

随着现代工业的发展,用电设备对电能质量的优劣更加敏感。不合格的电能质量可能导致生产出的产品不合格,在一些连续的生产过程中,突然中断供电将带来很大的经济损失。因此,电能质量的优劣已成为电网运行与管理水平高低的重要标志,控制和改善电能质量是保证电网自身可持续发展的必要条件,也是建设我国智能电网的必然要求。

1.2 电能质量控制技术的发展现状

1.2.1 谐波抑制技术

谐波抑制技术主要分为主动治理技术和被动治理技术。主动治理技术即为在谐波源处降低或消除谐波,而被动治理技术采用补偿装置消除谐波。本书讨论的谐波抑制主要指被动谐波抑制技术。当前的被动谐波抑制技术主要有无源电力滤波器(passive power filter, PPF)、有源电力滤波器(active power filter, APF)和统一电能质量补偿器(unified power quality compensator, UPQC)。无源电力滤波器利用电感、电容元件为电网谐波提供低阻抗通路,从而降低流向电网的谐波电流,但无源电力滤波器只能滤除特定次数的谐波,滤波性能受自身参数和电网参数的影响大,存在谐波放大或与系统等效阻抗发生谐振的可能性等^[3]。有源电力滤波器能对频率和大小都变化的谐波进行动态补偿,补偿特性不受电网阻抗和频率变化的影响,可获得比无源滤波器更好的补偿效果,

是一种理想的谐波补偿装置,而且,通过改变其控制算法可以实现多种功能,如抑制谐波、补偿无功、抑制闪变、补偿相间不平衡等,因而引起了人们极大的关注。统一电能质量补偿器由串联型有源电力滤波器和并联型有源电力滤波器组合而成,能对电压和电流谐波进行综合补偿,功能更全面^[4,5]。

有源电力滤波器凭借其优越的性能,在电力电子技术进步的推动下,已步入工业实用化和推广应用阶段。应用于低压配电网的有源电力滤波器多为单个逆变器结构,在补偿容量需求较大时可采用多个逆变器并联结构。目前单台有源电力滤波器最大容量已达到 60MVA。由于电力电子开关器件的耐压和容量限制,单独使用的有源电力滤波器多用于中低压系统^[6]。单独采用有源电力滤波器实现高压配电网大功率的谐波补偿较为困难,而且成本也非常昂贵。混合型有源电力滤波器(hybrid active power filter, HAPF)将无源电力滤波器和有源电力滤波器结合起来,取两者之长,避免它们的短处,使整个滤波系统获得良好的性能^[7~10]。针对混合型有源电力滤波器,学者们积极探寻降低有源逆变器容量的拓扑结构。在注入式混合型有源电力滤波器(injection-type hybrid active power filter, IHAPF)中,将有源电力滤波器部分与基波谐振支路组合连接,有效降低了有源部分的容量和承受的电压,使其成为目前适用于高压配电网谐波治理的主要拓扑结构之一^[11~13]。

当前我国低压配电网的有源电力滤波器的技术与工程应用经验相对成熟,而适用于高压配电网的大容量有源滤波装置还未大范围应用。目前的混合型有源电力滤波器对谐波能进行动态抑制,但无法同时对无功进行动态调节,而工业应用场合期望对谐波和无功同时进行动态调节,以降低谐波和稳定电压。因此,谐波和无功综合动态抑制技术的研究非常必要,本书在后续章节有相关内容的讨论。有源电力滤波器发展到今天,高压大容量和可靠性将是其发展趋势,随着有源电力滤波器技术的日益成熟,在高压配电网应用的范围将越来越广。

1.2.2 无功补偿技术

在工业企业配电网系统中,随着感性负载及非线性负载的不断增加,电网功率因数较低、谐波污染严重,导致配电网损耗大、供电电压指标难以满足用户要求^[14]。配电网用户侧无功补偿的主要技术手段有固定电容器(fixed capacitor, FC)、接触器自动投切电容器(contactor automatic switched capacitor, CASC)、晶闸管投切电容器(thyristor switched capacitor, TSC)、晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)、配电网静止同步无功补偿器(distribution static synchronous var compensator, DSTATCOM)等。

并联电容器具有结构简单、经济方便等优点,因而曾经获得广泛的应用。但是,并联电容器只能实现固定容量的无功功率补偿,不能进行无功连续调节;尤其是当电网谐波含量较高时,电容器容易与系统等效阻抗发生谐振,不仅会导致电容器组因谐波放大而烧毁,同时会危及电网用电设备的可靠运行。为实现无功功率的分组投切,人们逐步提出了机械投切电容器、晶闸管投切电容器等。与机械投切电容器相比,晶闸管投切电容器更具优势:一方面晶闸管的投切时刻可以精确控制,以减少投切时的冲击电流;另一方面晶闸管的使用寿命更长,有利于降低成本。分组投切电容器组虽然具备了无功分级调节的能力,但随着投切组数的变化,对于谐波污染较为严重的场合,谐波放大的可能性明显增加。



DSTATCOM 具有抑制电网电压波动、消除电网谐波、补偿不平衡等功能,并且性能优良,因而颇受关注。从目前的研究成果及发展现状来看,研究性能优良、易于实现的检测技术和控制方法以及高效可靠的 DSTATCOM 实现技术是主要的发展方向。在电压控制方面,PI 控制方法及智能控制技术等均在 DSTATCOM 电压控制中得到了应用^[15];在电流控制方面,一般采用直流侧电压外环和无功电流内环相结合的双闭环控制模式。DSTATCOM 电流跟踪控制实际上就是通过一定的控制手段,使得 DSTATCOM 的交流输出快速跟踪指令信号,并达到较高的稳态控制精度^[16,17]。此时,DSTATCOM 一般具有抑制谐波、动态补偿无功及补偿不平衡的功能。DSTATCOM 具有响应速度快、功能强等特点,但是低压大容量的 DSTATCOM 实现困难、成本高,尤其是考虑滤波功能时 DSTATCOM 的容量难以满足大容量的谐波治理,同时 DSTATCOM 价格较为昂贵,导致低压 DSTATCOM 在实际工业应用时受成本的制约难以大规模推广应用。

低压智能无功补偿技术与实现

目前电力系统低压侧接入的用电负荷不但快速增加,而且负荷成分也多种多样。这些负荷往往具有非线性和感性的特征,随着用电负荷的加大,这些负荷会给低压配电网带来一系列的电能质量问题。比如,工业企业配电网接入大量的电动机,这些电动机向输电线路传送大量的无功功率,降低了输电线路功率因数;冶炼厂的低压整流设备也带来无功功率问题;白炽灯已逐渐被荧光灯取代,白炽灯是一种线性度很好的负载,而荧光灯是一种非线性的感性负载,会同时向电网注入谐波和无功电流;家用电器如空调、洗衣机、电风扇等都是感性负载,这些负载的大量使用会给低压电网带来无功冲击。由于低压系统一般短路容量较小,线路阻抗又相对较大,因此无功电流引发的电能质量问题更加显著。

2.1 无功补偿的原理和意义

无功功率并不是无用功率,而是在电能传输和转换过程中建立电磁场和提供电网稳定不可缺少的功率之一。无功经不同的电磁耦合反映不同的电压等级,同一等级电压电网中,电压的高低直接反映本级的无功平衡,是电能质量的重要指标之一。电力系统正常时,无功处于平衡状态,当系统的无功缺少时,系统的电压就会降低,从而使负载所需的无功减小来维持无功的平衡;而当系统的无功功率过剩时,系统就会运行在较高的电压水平来维持无功的平衡。电力系统是一个每时每刻都在变化的系统,系统所需的无功也是时刻变化的,如果不加以控制使其迅速达到平衡,就会引发一系列的电能质量问题,如电压波动、过电压、欠电压等。

2.1.1 无功补偿的原理

配电网中常用的无功补偿方式有多种,目前常采用的无功补偿方式有就地无功补偿、分散无功补偿和集中无功补偿。下面以一种某低压母线上典型的集中无功补偿为例,对无功补偿的原理作简要阐述。

无功补偿的原理可用图 2-1 即负载和补偿系统的单相等效电路图来说明。图 2-1 中, $\dot{U}_s$ 和 $\dot{U}_2$ 分别为系统电源和接入点相电压; $\dot{I}_L$ 、 $\dot{I}_C$ 、 $\dot{I}_s$ 分别是负载电流、补偿器吸收的无功电流、母线电流; $Z_s=R_s+jX_s$ 表示线路阻抗; Q_C 为补偿电容器发出的无功功率; P_L+jQ_L 为负载所消耗的功率。

补偿电容器未投入之前, $\dot{U}_s$ 和 $\dot{U}_2$ 的关系可用图 2-2 来表示。如果以公共连接点 PCC 的电压 $\dot{U}_2$ 作为参考电压相量, 负载电流在线路和变压器等效阻抗上产生的压降 $\Delta\dot{U}$ 就由两部分组成, 即与 $\dot{U}_2$ 相位一致的 $\Delta\dot{U}_R$ 和与 $\dot{U}_2$ 正交的 $\Delta\dot{U}_X$, 若 $U_{\text{ref}} = |\dot{U}_2|$, 则

$$\Delta U_R = \frac{R_s P_L + X_s Q_L}{U_2} \quad (2-1)$$

$$\Delta U_X = \frac{X_s P_L - R_s Q_L}{U_2} \quad (2-2)$$

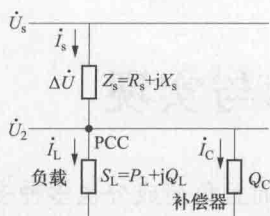


图 2-1 负载和补偿系统的单相等效电路图

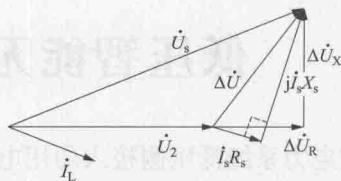


图 2-2 无功补偿时的相量图

若 $R_s \ll X_s$, 忽略不计, 则

$$\Delta U_R = \frac{X_s Q_L}{U_2} \quad (2-3)$$

$$\Delta U_X = \frac{X_s P_L}{U_2} \quad (2-4)$$

可见, $\dot{U}_s$ 和 $\dot{U}_2$ 的幅值差主要由 Q_L 决定, 相位差主要由 P_L 决定。显然, 当负荷的无功功率发生变化时, 用户端电压也会发生变动。因此有必要采用无功补偿装置对变化的无功功率进行补偿, 通过无功补偿维持电压稳定。

图 2-3 给出了有无功补偿时, 相应的电流电压相量图。

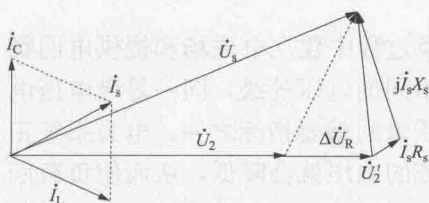


图 2-3 无功补偿时的相量图

由图 2-3 可知, 通过控制无功补偿装置的输出无功电流 I_C 可以使公共连接点电压和电源电压在幅值上相等, 即 $|\dot{U}'_2| = |\dot{U}_s|$ 。这样便实现了电压补偿的目的。

当然我们实际上要求接入点的电压并不一定要与电源电压相等, 而是维持在一个额定值, 即 $U_{\text{ref}} = |\dot{U}'_2|$ 。由式 (2-3) 可得, 此时补偿器所

吸收无功功率应为

$$Q_C = \frac{\Delta U_R U_{\text{ref}}}{X_s} \quad (2-5)$$

即一台可以吸收无功功率 Q_C 的补偿器, 可以补偿的系统电压变化为

$$\Delta U_2 = \frac{X_s Q_C}{U_{\text{ref}}} \quad (2-6)$$

因此得到以下结论:

- (1) 无功电流流过线路阻抗, 产生电压降, 降低了公共连接点母线电压水平。
- (2) 在母线上投入容性无功补偿装置, 感性负载所需的无功直接由无功补偿装置提供, 避免了无功电流在线路上的流动, 使得输电线路电流减小, 电压降 $\Delta\dot{U}$ 减小。因此,

母线电压 U_s 和功率因数提高。

2.1.2 无功补偿的意义

1. 提高电网电压水平

若输电线路流过的无功功率为 Q ，线路的阻抗为 X_s ，忽略输电线路的电阻，则因系统电压 U_s 与公共连接点电压 U_2 的相位差很小，由图 2-2 可以看出，系统电压与公共连接点电压的幅值差近似等于 ΔU_R ，由式 (2-3) 可得公共连接点电压 U_2 的幅值可近似表示为

$$U_2 = U_s - \Delta U_R = U_s - \frac{QX_s}{U_2} \quad (2-7)$$

从式 (2-7) 可以看出系统无功功率传输或者变化都会引起系统母线电压的变化。

在系统母线侧加装无功补偿装置进行无功功率补偿后，系统供给的无功功率为负载和补偿装置无功功率之和，即

$$Q = Q_L + Q_C \quad (2-8)$$

当负载所需无功功率为 Q_L ，在 Q_L 保持不变或者发生变化时，如果补偿装置提供无功功率 Q_C 能跟踪 Q_L 的变化，从而使 Q 维持不变，则供电电压可保持恒定。

2. 降低线路损耗

假定输电线路通过电流为 I ，额定电压等级为 U ，线路压降为 ΔU ，线路电阻为 R ，那么线损可以表示为

$$P = \Delta U^2 R / |R + jX_s|^2 \quad (2-9)$$

由于电阻比电抗小很多，所以 P 可以改写为

$$P = Q^2 R / U^2 \quad (2-10)$$

可见，线路有功损耗 P 与 Q^2 成正比，线路传输无功功率越大，则线路损耗 P 越大。因此对系统进行无功补偿使得输电线路传输的无功功率减小，就可以降低线路损耗。

投入补偿装置补偿无功 Q_C ，那么补偿后的功率损耗为

$$P' = (Q - Q_C)^2 R / U^2 \quad (2-11)$$

功率损耗减小量为

$$\Delta P = P - P' = (2QQ_C - Q_C^2)R / U^2 \quad (2-12)$$

3. 降低变压器损耗

变压器铜损耗是绕组电阻消耗的功率，假定变压器的额定电流为 I_N ，绕组电阻为 R ，那么变压器的额定铜损为

$$\Delta P_N = I_N^2 R \quad (2-13)$$

若负荷率为 β ，则补偿前流过变压器的电流为

$$I_1 = \beta I_N \quad (2-14)$$

由于补偿前后有功功率不变，那么补偿前后的有功电流相等，即

$$\beta I_N \cos \varphi_1 = I_2 \cos \varphi_2 \quad (2-15)$$

式中： $\cos \varphi_1$ 为补偿前变压器负载的功率因数； $\cos \varphi_2$ 为补偿后变压器负载的功率因数； I_2 为无功补偿后流过变压器的电流。

由式 (2-13)~式 (2-15) 得铜损减少的有功功率为

$$\Delta P_T = I_1^2 R - I_2^2 R = \beta^2 \Delta P_N \left(1 - \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2}\right)^2 \quad (2-16)$$

2.2 低压无功补偿装置

现代工业企业特别是精密制造业和加工企业对电网电压波动限制的要求越来越高, 这些要求主要包括电压波动的幅值限制及波动时间的限制。这就要求无功补偿装置应具有很快的响应速度和较高的补偿精度。在晶闸管出现之前, 有触点的无功补偿装置大都采用机械投切的方式, 如机械投切电容器 (mechanically switched capacitor, MSC)。随着大功率半导体器件的出现及微控制器和 DSP 技术的发展, 出现了很多具有优异补偿性能的无触点动态无功补偿装置, 例如晶闸管控制电抗器、晶闸管投切电容器, 以及这两者的混合装置, 或者晶闸管控制电抗器与固定电容器或机械投切电容器混合使用的装置 (如 TCR+FC、TCR+MSC 等)。其快速的响应、适中的价格, 使其在电力系统中得以迅速的推广。下面将简要介绍机械投切电容器、晶闸管控制电抗器的基本原理。由晶闸管控制电容器构成的智能型无功补偿器及其实现将在本章进行详细讨论。

2.2.1 机械投切电容器 (MSC)

电容器在基波电压下能够提供容性无功功率, 当电网电流滞后于电网电压, 且功率因数较低时, 可以通过投入电容器提供一个超前的无功电流相量, 将滞后电网电压角度的负载电流相量向电网电压相量靠拢。

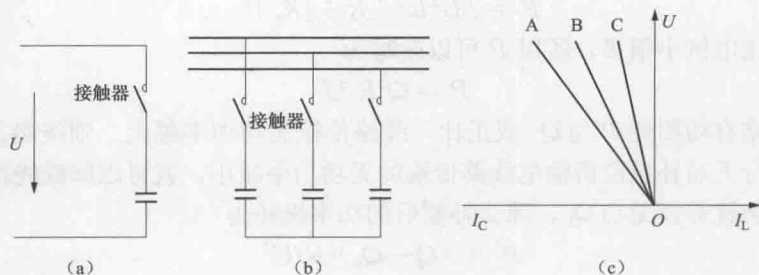


图 2-4 MSC 的结构和补偿特性

(a) 单相结构图; (b) 三相投切 TSC 简图; (c) 电压—电流特性

电容器分组的具体方法比较灵活, 一般希望能组合产生的电容值级数越多越好, 但是综合考虑系统复杂性及经济性问题, 可以采用二进制的方案, 即采用 $k-1$ 个电容值均为 C 的电容和一个电容值为 $C/2$ 的电容, 这样的分组法可使组合成的电容值有 $2k$ 级。

MSC 多采用单片机控制, 通过交流接触器来实现电容器分组投切。采用这种机械投切方式的优点是开关导通电阻小, 功率损耗小; 并且接触器能够将容量做得很大, 因此能够投入和切除的电容器组数多。但是, 接触器投切也有以下缺点:

(1) 接触器的使用次数是有限的, 如果电网电压波动频繁, 那么接触器闭合和开断次数也会增加, 频繁投切容易损坏接触器。

(2) 响应速度较慢, 一般需要 100ms 左右的反应时间, 因此对于频繁变动的无功负荷, 采用接触器控制投切电容器组不能快速跟踪负荷的变化。

(3) 冲击电流大, 如果投切时刻电容器组上的电压与电网电压不相等, 投入电容器组时就会形成较大的冲击电流。

2.2.2 晶闸管控制电抗器 (TCR)

晶闸管控制电抗器 (TCR) 的原理如图 2-5 所示, 其基本结构是两个反并联的晶闸管与一个电抗器相串联。TCR 的三相一般采用三角形连接方式, 其目的是实现 3 倍次谐波相互抵消, 防止其渗入电网。

TCR 触发延迟角 α 的有效范围是 $90^\circ \sim 180^\circ$ 。TCR 电流的基波分量 $I(\alpha)$ 与晶闸管触发角 α 的关系为

$$I(\alpha) = \frac{U_{PCC}}{\omega L} \left(2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (2-17)$$

式中: U_{PCC} 为公共连接点电压; L 为单相电抗的感抗值。

TCR 的等效电纳 $B_{TCR}(\alpha)$ 可表示为

$$B_{TCR}(\alpha) = B_{max} \left(2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (2-18)$$

其中, 等效电纳最大值 $B_{max} = 1/L$ 。

触发角 α 和导通角 φ 有如下关系

$$\alpha + \frac{\varphi}{2} = 180^\circ \quad (2-19)$$

将式 (2-19) 分别代入式 (2-17)、式 (2-18) 得到导通角 φ 和 TCR 电流的基波分量 $I(\varphi)$ 的关系为

$$I(\varphi) = U_{PCC} B_{max} \left(\frac{\varphi - \sin \varphi}{\pi} \right) \quad (2-20)$$

导通角 φ 与 TCR 的等效电纳 B_{TCR} 的关系为

$$B_{TCR}(\varphi) = B_{max} \left(\frac{\varphi - \sin \varphi}{\pi} \right) \quad (2-21)$$

根据以上公式, TCR 的工作原理可描述为: 当触发角 α 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间时, 改变晶闸管导通角 φ , 从而可以控制 TCR 注入电网的无功电流中的基波分量 $I(\varphi)$, 实现 TCR 对电网的无功补偿; 当触发角 α 为 180° 时, 其导通角 φ 为 0° , 晶闸管完全关断, 与晶闸管串联的电抗器与电网断开, 此时没有对电网无功进行补偿; 当触发延迟角 α 为 90° 时, 其导通角 φ 为 180° , 晶闸管完全导通, 与晶闸管串联的电抗器相当于直接并入电网, 这时 TCR 吸收的容性无功电流最大。

TCR 响应速度较快, 响应时间一般在 $1/4$ 个周波之内, 能实现对无功功率的连续调节, 还能进行分相控制, 有较好的抑制不对称负荷的能力, 一般与固定电容器一起使用。但是由于它本身就是一个谐波源, 不可避免的要向电网中引入谐波。

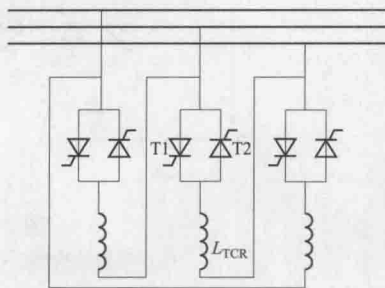


图 2-5 TCR 原理图

2.3 无触点低压智能无功补偿装置技术与实现

通过 2.2 节分析可知, 传统的有触点无功补偿装置在响应时间和补偿精度两方面都很难满足要求。本章将着重研究以 TSC 为主电路结构的低压智能无功补偿器 (intelligent var compensator, IVC)。

2.3.1 低压智能无功补偿器 (IVC) 的基本原理

低压智能无功补偿器 (IVC) 实质上是由 TSC、数字信号处理器及通信系统构成的统一智能无功补偿器, TSC 的主电路结构和补偿特性如图 2-6 所示。

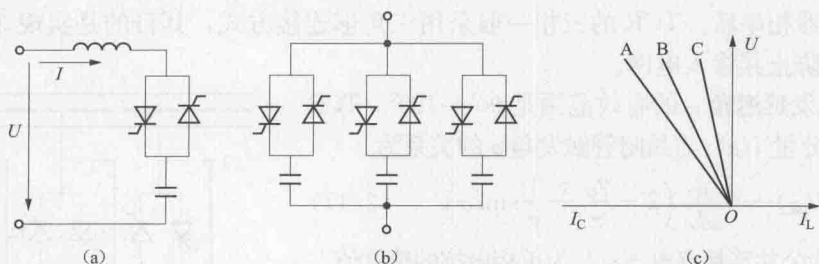


图 2-6 TSC 的主电路结构和补偿特性

(a) 单相结构图; (b) 分组投切的 TSC 单相简图; (c) 电压—电流特性

两个反并联晶闸管的作用是将电容器并入电网或从电网切除, 而串联的小电感是用来抑制电容器投入电网时可能造成的冲击电流。因此, 当电容器投入时, TSC 的电压—电流特性就是该电容器的伏安特性, 即如图 2-6 (c) 中 OA 所示。可根据电网的无功需求投切这些电容器, TSC 实际上就是分级可调的吸收容性无功功率的动态无功补偿器, 其电压—电流特性按照电容器组数的不同可以是图中的 OA 、 OB 或 OC 。当 TSC 用于三相电路时, 可以是 Δ 形连接, 也可以是 Y 形连接。

2.3.2 IVC 主电路控制技术

IVC 主电路控制采用专用过零触发电芯片 MOC3061, 其目的是消除无触点开关投切电容时产生的冲击电流。同时, 采用通断率控制来控制电容器的投切, 这样既达到了无级调节的目的, 又减少了谐波对电网的污染。MOC3061 输入与输出采用光电隔离, 且内部采用了过零检测电路, 如图 2-7 所示, 实现了控制电路和主电路的有效隔离。

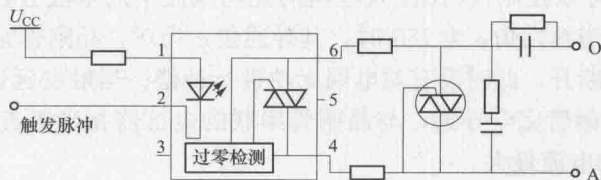


图 2-7 单相无级投切电容器输出部分原理图

此外, 主电路采用晶闸管和二极管反并联的方式代替两个反并联的晶闸管, 可以使导通前电容充电电压维持在电源电压的峰值, 如图 2-8 所示。一旦电容电压比电源电压峰值有所降低, 二极管就会将其充电至峰值电压, 因此不会发生两晶闸管反并联的方式中电容充电电压下降的现象。但是, 由于二极管是不可控的, 当要切除此电容支路时, 最大的时间滞后为一个周波, 因此其响应速度比两晶闸管反并联的方式稍慢, 但成本较低, 而且考虑到实际需要, 这种方式一般可满足补偿的快速性要求。

V 为晶闸管, VD 为反并联的二极管, C 为补偿电容, R 是与 C 并联的大阻值泻荷