

Technology
实用技术

高效电能变换应用丛书

市电电能 质量补偿技术

刘凤君 编著



科学出版社

www.sciencep.com

高效电能变换应用丛书

市电电能质量补偿技术

刘凤君 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是“高效电能变换应用丛书”之一。市电电能是存在着某些质量问题的“粗电”。本书所述内容是将这种“粗电”,通过高频电能变换器及其串并联电路,将其补偿成满足用户需要的“精电”的一种电能质量补偿技术。这种技术是最近十几年才发展起来的,是建立在 PWM 高频电能变换器及其串联、并联和串并联补偿电路基础之上的一种最新技术。

本书共五章:第 1 章介绍当前市电电能质量存在的问题以及解决这些问题所用的 PWM 高频电能变换器及其串并联补偿电路,并介绍与此有关的一些基本概念、工作状态及控制方法等;第 2 章介绍对市电电压质量的补偿;第 3 章介绍对市电输入电流无功与谐波分量的补偿;第 4 章介绍对市电电压与市电输入电流的串并联综合补偿;第 5 章介绍对市电质量全面补偿的高频电能变换器 HFPC 串并联补偿式 UPS。其中市电质量的串并联综合补偿器及 HF-PC 串并联补偿式 UPS,在我国还是空白。

本书可供从事电力电子电源技术、交流稳压电源、电力有源滤波器及 UPS 电源研究开发的广大中高级科技人员阅读,也可以作为大学相关专业的学生、研究生及教师参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

市电电能质量补偿技术/刘凤君编著. —北京:科学出版社,2005
(高效电能变换应用丛书)
ISBN 7-03-015784-2

I. 市… II. ①刘… III. 城市-供电-功率补偿 IV. TM727.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 069287 号

责任编辑:肖京涛 崔炳哲/责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平/封面设计:李 祥

北京东方科苑图文有限公司 制作

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

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 10 月第一次印刷 印张: 23 1/2

印数: 1—4 000 字数: 448 000

定 价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

丛书序

电能是现代社会不可或缺的重要能源。在 21 世纪,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。

在现代社会所有的动力资源中,电能使用最方便,适用范围最广泛。电能在不同领域的深入应用,以及对高效率、高功率密度、高可靠性电能变换的需求,推动着电能变换技术、理论、电路、材料和工艺的发展。《高效电能变换应用丛书》即从应用“电能变换”技术的角度,讨论获取最佳供电的方法,同时探求节省能源和保护环境的高效电能变换的有效装置。

我们知道,未经加工和调理的原生态电能是有效电能的初始态。电网是电能的支柱,燃油发电机是防备电网故障或远离电网的应急和补充,太阳能电池、风力发电、潮汐发电等是向自然能换取电能的有效途径,燃料电池、铅酸蓄电池、锂离子电池、干电池等是可再生或一次性的电能载体。

对于现代社会大多数用电领域,原生态电能在某种意义上都是“粗电”。使用“粗电”将不尽如人意。例如,针对不同用户,电网上的电就不一定好用。电网是公用的,电网在高峰期和低谷期的电压存在差异。由于不同用户从电网支取电能的时机和电量的不确定性和偶然性,特别是大型设备的启动和刹车,会给邻近电网造成随机的瞬时冲击和定式落差;雷电、风暴、炎热等自然因素造成电网扰动甚至供电瞬时中断等,也将给敏感用户带来麻烦;设备运转失常、系统效率降低、计算机数据丢失、逻辑功能混乱,严重时还将造成系统硬件损坏,使系统工作陷于瘫痪。为此,需要在电网上游运用柔性输配电控制,而在电网下游采用稳压器和 UPS 对从电网下载的粗电进行整合和修补。

由于电池自身具有的电容性,电压瞬时波动可能比电网小。但电池在工作中也存在不少问题,最常见的问题是电池电量随工作时间的延长或用电量的加大会逐渐衰竭。另外,电池单体的电压较低,以其自然形态很少可直接使用,多数是串联或串并联组合使用,这种使用方式很难保证串联或串并组合中的每个单体的特性一致。为此,必须实施合理的充电、放电和监管。

太阳能电池能将阳光转换成电能,但阳光的照射会因向背、阴晴、昼夜、四季而不均衡,为此需要对转换的电能进行收集储存、再经 DC-DC 或 DC-AC 变换,获得稳定的直流电和交流电。风力等自然能发电同样受自然因素牵制,借助风力等自然力传动的发电机输出的电力经常处于不稳定状态,也必须实行调整控制。……

在供电和用电的大舞台上,电能变换充当着极其重要的角色;在电能变换领域,以高频逆变技术为核心的 PWM 开关控制能使上述的许多问题迎刃而解,它比传统的低频电能变换有更多的优点。例如,高频逆变可使电能变换设备成十倍地缩小体积和重量,还可显著降低能耗和电磁干扰,可赋予设备数字化、智能化特性等等。这里所谓的高频,是相对于工频变换 50Hz 以及 20 世纪 60 年代兴起的 20kHz 变换频率的更高变换频率:数十 kHz、数百 kHz 乃至数 MHz 等。高频变换装置的功率密度随频率的提高而提高,器件和材料的开关损耗也随之愈加突出,促使高频损耗小的功率器件和材料不断获得改进。由此,高频损耗小的软开关 PWM 电路在近十年中取得了神速的发展。这些都使高效电能变换装置日臻完美。

不论是电网、电池还是相对独立的供电系统,都存在电磁环境问题。即在电力运行中因环境电磁干扰(如雷电、汽车点火引发),或共享电源母线的负载设备的电磁干扰,或 DC-DC、DC-AC 转换装置自身的电磁干扰,搅得“四邻不安”。因此,电磁兼容性成为供电和用电都必须面对的复杂问题。

现代社会的电网面临的承载非常严酷。由于功率半导体开关器件的长足进步、控制技术日益先进,变流设备的功率等级提升极快;又由于采用变流举措的负载设备日益增多,其复杂的负载性质带来的负面影响突出。基于这些因素的电网存在功率因数低下、波形畸变、浪涌、相位丢失等不良境况。因此,电能质量控制刻不容缓,电力补偿、有源滤波等电能变换技术在电网和用户之间能起到较佳的缓冲匹配作用。

能源问题在本世纪占据瞩目位置,人们在追求节约电能方面有卓越贡献的高效能供电设备和用电方法。在现实中,相当一部分电能消费是以驱动电机的形式进行的,如机床、电动工具、电动汽车、城市轻轨、传动系统、机器人、风机、水泵、纺机、空调等等。直接用粗放的原电驱动,免不了要引入串联阻抗或并联阻抗,以便控制和调节电机的运行状态,而这些不得已介入的阻抗会白白消耗电能。为了将这些浪费掉的非常可观的电能“拣”回来,利用现代电能变换技术对电机实行变频控制,具有很好的节电潜力。

照明用电据称占全球总体用电较大比重,节电潜力巨大,起源于欧美的绿色照明浪潮大有席卷全球之势。绿色照明的主题词:最小耗电产生最大流明。除了新型电光源和新型发光介质外,以全新的高频电能变换技术装备的电子镇流器将是实现绿色照明的重要手段。

生产力愈发展,技术越进步,环境问题愈加突出。电能的生产、变换、使用在很大程度上影响到环境。电能的生产一般伴随二氧化碳、二氧化硫气体排放,前者是地球温室效应气体,后者是酸雨的成因,两者对环境危害都很大。少一点电能生产却能换得少一点环境恶化。生产发展必然要增加电力的需求,关键在于节约电力,减少电力的浪费。这要求我们的电源装置、电能变换系统提高效率。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。节约电能、电磁兼容、无环境污染的绿色供电势在必行。

21 世纪将是科学技术突飞猛进的时代,技术进步必定会牵动电能变换技术需求急速膨胀。《高效电能变换应用丛书》在这一时刻呈献给读者,意在诠释电能变换技术的最新应用。

电能变换技术是实用性极强的技术,服务于各种领域,内容丰富。一套丛书毕竟规模有限,实难尽述。我们企望借助几个具有典型意义的层面,如高频功率变换、变频传动、电能质量控制等在学术、产业都呈热点的几个方面展示多彩的电能变换技术应用。丛书主要供中等技术水平的科技人员阅读,在概念和应用实例方面照顾到其他层面的科技人员。丛书的读者定位为电源技术、运动控制、电力电子、电子技术、信息技术、能源转换、过程控制等应用领域的工程技术人员,以及科技爱好者们。

《高效电能变换应用丛书》编辑委员会

《高效电能变换应用丛书》

编辑委员会成员名单

主任委员	倪本来	中国电源学会编辑工作委员会主任	教授级高级工程师
副主任委员	陈建业	清华大学	研究员
	徐德鸿	浙江大学电气工程学院常务副院长	教授,博士生导师
	阮新波	南京航空航天大学	教授,博士生导师
委 员	(以下按姓氏笔画排序)		
	丁道宏	南京航空航天大学	教授
	区健昌	北京理工大学	教授
	王志通	北方交通大学	教授
	王赞基	清华大学	教授,博士生导师
	邓智泉	南京航空航天大学	教授,博士
	艾多文	航天工业总公司二院 25 所	教授级高级工程师
	刘凤君	航天工业总公司二院 206 所	研究员
	刘晓融	科学出版社	编审
	阮新波	南京航空航天大学	教授,博士生导师
	李永东	清华大学	教授,博士生导师
	李厚福	北京电视技术研究所	高级工程师
	沙 斐	北方交通大学抗电磁干扰中心主任	教授,博士生导师
	张 立	天津大学	教授
	张 宙	香港理工大学	副教授,博士
	张卫平	北方工业大学	教授,博士
	张中相	中国运载火箭技术研究院第十五研究所	研究员,博士生导师
	张占松	广东工业大学	教授
	张志国	中国运载火箭技术研究院第十四研究所主任	研究员
	陈 坚	华中理工大学	教授,博士生导师
	陈永真	辽宁工学院	副教授,硕士生导师
	陈建业	清华大学	研究员
	陈慕平	(台湾)工业技术研究院能源与资源研究所	博士
	罗方林	新加坡南洋理工大学	教授,博士
	季幼章	中科院等离子体研究所	研究员
	郑琼林	北京交通大学电气学院院长	教授,博士生导师
	赵争鸣	清华大学	教授,博士生导师
	赵良炳	清华大学	教授
	赵修科	南京航空航天大学	教授

倪本来 中国电源学会编辑工作委员会主任 教授级高级工程师
倪海东 北京奥米伽电源技术服务中心主任 副教授
徐德鸿 浙江大学电气工程学院常务副院长 教授,博士生导师
黄济荣 株洲电力机车研究所 教授级高级工程师,博士生导师
龚绍文 北京理工大学 教授
龚幼民 上海大学 教授
崔炳哲 科学出版社 编辑
路秋生 北京职业技术学院 教授

前言

对于市电电源,一般人常常有一个误解,认为市电电源除了偶尔发生故障外,通常是连续而稳定的标准交流正弦波电源。其实不然,作为公共电源,市电连接着成千上万个各种各样用户的负载。由于市电电源本身和用户负载的复杂性,例如电源容量的不足、变电和各种配电设备存在的性能和质量问题、各用电和配电设备配置的不合理性、设备之间的相互影响、用户中各类非线性负载的污染等因素,以及自然界的雷击、地电及人为因素的影响等,使市电的电能质量不能保持在稳定的交流正弦波状态,而是不断地恶化,并存在着各种不符合用户要求的供电质量问题。根据电力部门的测试,能够对用户负载产生干扰及破坏的主要问题有以下几种:①输出电压有效值高于额定值 110%,持续时间长达一个周期到数个周期的电涌;②峰值达 6000V,持续时间长达万分之一秒至二分之一周期(10ms)的高压尖脉冲;③电压有效值介于额定值的 80%~85%,持续时间长达一个周期到数个周期的电压下陷;④由射频干扰和电磁干扰以及其他各种高频干扰引起的线路噪声;⑤市电频率变化超过 3Hz 以上的频率偏移;⑥电压有效值低于额定值,持续较长时间的持续低电压;⑦因市电供电中断或电网故障引起的市电电源中断等。此外,在供电可靠性方面也存在着严重问题。例如,据统计,2003 年我国平均每户停电时间为 8 小时(日本是 10 分钟),停电次数年平均为每户 2 次(发达国家为每户 0.3 次)。因此,市电电源常常被人们称为“粗电”。

随着我国信息产业的发展,网络化趋势已成为当代的潮流,电子商务、政府上网等,将极大地推动网络化的进程。存在着上述电能质量问题的市电电源(粗电),是无法直接使用的,它会给用户带来很多不利影响。例如,在金融系统中任何一个中心的瘫痪都会导致周围十几个省市银行业务的中断,造成千百亿的资金出不去也进不来;一个企业的电子商务中断,也会严重影响企业的声誉,降低办事机构的效率。各行业中的企事业单位,很多都是用电的大户,对于存在着上述严重质量问题的市电电源,有的用户也无法直接使用,如在现代化的医院,抢救、监护病人主要靠电子监测和治疗仪器,由于市电电源质量不好而引发的仪器故障会造成病人的生命危险;一个工业生产过程中如果电源质量不好或出现中断,也会引起生产停止,或使产品报废、设备损坏。

当市电容量不足时,我国的对策是首先要保证老百姓的日常用电,缺电时政府实行首先拉掉企业用电。这样,企业对供电的稳定性和可靠性的要求就更加不能满足。企业虽然不能够对市电的稳定性和可靠性进行直接控制,但可以对自身小系统的电能质量和可靠性进行自我改造。本书所述的市电电能质量补偿技术,就是专门用于解决各用户用电的质量问题的技术,采用的办法是用脉宽调制(PWM:Pulse Width Modu-

lation)高频电能变换器的串并联电路,对有问题的市电电源,即“粗电”,进行电能质量补偿。本书共有五章:第1章介绍当前市电电能质量存在的问题,以及解决这些问题所采用的PWM高频电能变换器(HFPC; High Frequency Power Converter)及其串并联补偿电路,并介绍与之相关的一些基本概念,工作状态及控制方法等;第2章介绍对市电电压质量的补偿;第3章介绍对市电输入电流无功与谐波分量的补偿;第4章介绍对市电电压与市电输入电流的串并联综合补偿;第5章介绍对市电质量全面补偿的HFPC串并联补偿式不间断电源(UPS; Uninterruptible Power System)。其中市电质量串并联综合补偿器及HFPC串并联补偿式UPS,在我国还是空白。

本书所述的市电电能质量补偿技术,是最近十几年才发展起来的,是建立在PWM高频电能变换器及其串联、并联和串并联补偿电路基础之上的一种新技术。也正是这种新技术把电力电子技术带到了电力系统中,开辟了电力电子技术的又一个广阔应用领域。市电电能补偿技术,不仅可以提高市电的电能质量,把“粗电”变成符合用户要求的“精电”,还可以提高市电供电的动态性能和对功率振荡的阻尼能力。

对于市电电能质量补偿的开发和运用,我国尚处于起步阶段,有几所高等学校做了很多实际工作。编写本书的目的在于普及知识,推广和加速企业的开发研制进程,意在抛砖引玉。由于水平所限,而且相关理论尚处于发展阶段,因此书中内容难免有不足和错误之处,敬请读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 市电电源——“粗电”	1
1.2 感性与非线性负载对市电质量的污染	2
1.3 用户对市电电能质量的要求	4
1.4 用于市电电能质量补偿的高频电能变换器	5
1.4.1 高频电能变换器的定义及应用领域	5
1.4.2 高频电能变换器的电压型和电流型电路	6
1.4.3 高频电能变换器的控制方式	8
1.5 采用高频变换器的补偿电路及其工作状态	11
1.5.1 电压源与电流源的概念	11
1.5.2 高频变换器的串联、并联和串并联补偿	11
1.5.3 高频电能变换器所用的开关器件	13
1.6 市电质量补偿指令值的检测与同步参考系	14
1.6.1 电压和电流的瞬时值波形比较法	15
1.6.2 瞬时值无功理论检测法	16
1.6.3 自适应干扰消除法	23
1.7 50Hz 交流标准电压发生器	26
1.8 i_q, i_h 检测电路中的低通滤波器	28
第 2 章 对市电电压质量的补偿	31
2.1 引 言	31
2.1.1 现状与发展	31
2.1.2 补偿方式及分类	32
2.2 HFPC 对单相市电电压的串联补偿——串联式 DVR	33
2.2.1 对市电电压波动值 $\pm \Delta u$ 的补偿	34
2.2.2 对市电电压波动值 $\pm \Delta u$ 和谐波 u_h 的补偿	37
2.2.3 开关整流器的功能和补偿容量的传输	38
2.2.4 高频变换器的类型与变压器的电压变比	39
2.3 AC 调节器对单相市电电压的串联补偿	40
2.3.1 补偿电路的组成与工作原理	40
2.3.2 AC 调节器的稳压控制电路	44

2.4	HFPC 对市电电压的并联补偿——单相并联式 DVR	47
2.5	HFPC 对市电电压的串并联补偿——单相串并联式 DVR	50
2.6	对三相市电电压的串联补偿——三相串联式 DVR	52
2.6.1	市电电压波动值 $\pm \Delta u$ 和谐波分量 u_h 的检测	52
2.6.2	三相串联净化稳压电源的 SPWM 开关整流器	56
2.6.3	三相 HFPC 变换器的串联补偿	62
2.6.4	三相串联补偿式交流净化稳压电源的其他电路类型	64
2.7	对三相市电电压的并联补偿——三相并联式 DVR	66
2.7.1	采用三相全桥式 HFPC 的并联补偿式 DVR	66
2.7.2	三相并联补偿式交流净化稳压电源的其他电路类型	72
2.8	三相串并联补偿式交流净化稳压电源电路	72
2.9	多功能并联补偿式三相交流净化稳压电源	73
2.9.1	电路组成与各部分功能	73
2.9.2	对市电电压波动、谐波和不对称度的补偿	80
2.9.3	对市电电压波动补偿时高频变换器的工作情况	83
2.9.4	市电掉电时高频变换器向负载提供 100% 功率	83
2.9.5	市电三相三线制电源变换成三相四线制电源	84
2.9.6	对负载无功和谐波电流的补偿与试验波形	85
2.10	只补偿市电电压波动的交流稳压电源	87
2.10.1	无触点 N 个补偿变压器切换式交流稳压电源	88
2.10.2	等脉宽调制斩波式交流稳压电源	94
2.10.3	采用 EPWM 桥式斩波器的交流稳压电源	104
第 3 章	对市电电流质量的补偿	112
3.1	引 言	112
3.1.1	现状与发展	112
3.1.2	补偿方式及分类	113
3.1.3	电力有源滤波器的主电路形式	114
3.2	HFPC 对电流无功与谐波分量的补偿原理	114
3.3	采用瞬时值波形比较法的电压型并联补偿 APF	119
3.3.1	高频变换补偿器的数学模型	120
3.3.2	电感 L 的值	121
3.3.3	控制方式	123
3.4	HFPC 有源与无源滤波器的混合补偿及注入电路方式	124
3.4.1	并联 APF 与无源滤波器的混合补偿	124
3.4.2	注入电路方式	126
3.5	电压型串联补偿电力有源滤波器	129

3.6 电力有源滤波器的主电路形式	131
3.6.1 单个高频变换器的主电路形式	132
3.6.2 多重化主电路形式	133
3.7 三相并联电力有源滤波器	134
3.7.1 高频变换器的容量与所用开关器件	135
3.7.2 无功与谐波电流的检出与直流电压的控制	135
3.7.3 被检测电流的提取点与控制方式	138
3.7.4 与 LC 无源滤波器的混合应用	141
3.8 三相串联电力有源滤波器	145
3.8.1 单独使用的串联电力有源滤波器	146
3.8.2 与 LC 无源滤波器的混合应用	148
3.9 有源滤波器的应用	156
3.9.1 单独使用的几种并联的电力有源滤波器	159
3.9.2 单独使用的几种串联的电力有源滤波器	161
3.9.3 单独使用的几种串-并联电力有源滤波器	164
3.9.4 元件参数、经济考虑和类型选择	164
第 4 章 对市电电压和电流质量的串并联综合补偿	169
4.1 引 言	169
4.2 单相 HFPC 电能质量综合补偿器	171
4.2.1 对市电电压的补偿	172
4.2.2 对负载无功与谐波电流的补偿	177
4.2.3 对市电电压波动补偿时变换器 I 和 II 的工作状态	179
4.2.4 对市电电压波动补偿过程中的功率平衡	181
4.2.5 高频变换器的补偿功率	183
4.2.6 滤波及抗干扰功能	184
4.3 AC 调节器式单相电能质量综合补偿器	185
4.4 三相全桥式 HFPC 电能质量综合补偿器	188
4.4.1 三相全桥式 HFPC 电能质量综合补偿器的组成与工作原理 ...	189
4.4.2 高频变换器 II 对不对称负载电流的补偿	191
4.4.3 不对称电流补偿指令值的计算实例及 NFT 功能	195
4.4.4 采用 $dq0$ 变换的三相全桥式电能质量综合补偿器	199
4.5 三相半桥式 HFPC 电能质量综合补偿器	201
4.5.1 组成与工作原理	201
4.5.2 高频变换器 I 对市电电压的补偿原理	206
4.5.3 高频变换器 II 对负载电流的补偿原理	207
4.5.4 高频变换器 I 和 II 的 PWM 控制电路	214

4.5.5	对市电电压波动补偿时变换器Ⅰ和Ⅱ的工作状态	215
4.5.6	对市电电压波动补偿过程中的功率平衡	216
4.5.7	高频变换器Ⅰ和Ⅱ的补偿功率	219
4.5.8	滤波与抗干扰功能	220
4.5.9	试验波形	221
4.6	采用瞬时无功理论检测法的综合补偿器	221
4.7	三相四桥臂式 HFPC 电能质量综合补偿器	227
4.7.1	高频变换器Ⅰ的控制	229
4.7.2	高频变换器Ⅱ的控制	230
4.7.3	高频变换器Ⅰ和Ⅱ的 PWM 控制	233
4.8	综合补偿器控制电流的取法与功能特点	233
4.8.1	控制电流的取法	233
4.8.2	电能质量综合补偿器的功能特点	236
第 5 章	双 HFPC 变换器串并联补偿式 UPS	239
5.1	引 言	239
5.1.1	UPS 的现状与发展	239
5.1.2	UPS 的分类及技术特点	241
5.2	单相 HFPC 串并联补偿式 UPS	242
5.2.1	高频变换器Ⅰ的工作与控制方式	245
5.2.2	高频变换器Ⅱ的工作与控制方式	248
5.2.3	高频变换器Ⅰ和Ⅱ对市电电压波动进行补偿时的工作状态 ...	250
5.2.4	对市电电压波动的补偿与补偿电压的建立	253
5.2.5	高频变换器Ⅱ向负载提供无功与谐波电流	258
5.2.6	市电中断时由高频变换器Ⅱ提供 100% 功率	258
5.2.7	高频变换器Ⅰ和Ⅱ的补偿功率	259
5.2.8	对市电电源干扰的抑制	260
5.3	采用 AC 调节器的单相串并联补偿式 UPS	262
5.3.1	电路组成及各部分的功能	262
5.3.2	AC 调节器的工作与控制方式	265
5.3.3	高频变换器的工作与控制方式	268
5.3.4	高频变换器向负载提供无功与谐波电流	269
5.3.5	对市电电压波动的补偿	270
5.4	三相全桥式 HFPC 串并联补偿式 UPS	272
5.4.1	三相全桥式 HFPC 串并联在线 UPS 的组成与工作原理 ...	272
5.4.2	高频变换器Ⅰ对不对称负载电流的补偿	275
5.4.3	不对称电流补偿指令值的计算及 NFT 功能	279

5.4.4	采用 $dq0$ 变换的三相全桥式串并联补偿式 UPS	282
5.5	三相半桥式 HFPC 串并联补偿式 UPS	285
5.5.1	三相半桥式 HFPC 串并联补偿式 UPS 的构成和各部分功能	287
5.5.2	高频变换器 I 的工作与控制方式	291
5.5.3	高频变换器 II 的工作与控制方式	299
5.5.4	高频变换器 I 和 II 对市电电压波动补偿时的工作状态	302
5.5.5	对市电电压波动的补偿与补偿电压的建立	304
5.5.6	高频变换器 I 和 II 的补偿功率	310
5.5.7	对市电电源干扰的抑制	311
5.5.8	试验波形	312
5.5.9	采用 $dq0$ 变换的三相半桥式 HFPC 串并联补偿式 UPS	313
5.6	三相三线制 HFPC 串并联补偿式 UPS	318
5.6.1	高频变换器 I 和 II 的工作与控制方式	320
5.6.2	控制方程与控制电路框图	325
5.6.3	仿真结果	328
5.7	三相四桥臂式 HFPC 串并联补偿式 UPS	332
5.7.1	高频变换器 I 的控制	332
5.7.2	高频变换器 II 的控制	335
5.8	高频变换器 I 电流指令值检测电流的取法	336
5.9	HFPC 串并联补偿式 UPS 的分析法与基本运行状态	337
5.9.1	串并联补偿式 UPS 的分析方法——功率平衡法	338
5.9.2	串并联补偿式 UPS 的基本运行状态	340
5.10	HFPC 串并联补偿式 UPS 的特点	344
5.10.1	与传统 UPS 在电路组成和结构上的区别	345
5.10.2	串并联补偿式 UPS 的功能特点及技术指标	347
5.10.3	不同类型 UPS 对市电电源及负载的适应能力	349
5.10.4	串并联补偿式 UPS 的所属类型、效率特性及应用范围	351
5.10.5	串并联补偿式 UPS 的蓄电池	354
参考文献		357

第 1 章 绪 论

作为本书的入门部分,在本章中将介绍当前市电电能质量存在的问题,以及为什么要对市电电能质量进行补偿,补偿所采用的 PWM 高频电能变换器及其串联、并联和串并联补偿电路、电路的工作状态和控制策略,以及与此有关的一些基本概念。

1.1 市电电源——“粗电”

市电电源是由发电站通过输配电把电能输送到用户的一种公用电源。其电能是由大型发电机组产生的。当在发电机励磁绕组中通以直流电流励磁,并在磁极下产生按正弦波分布的磁场时,在发电机定子绕组中就会感应出正弦电势,此电势使发电机输出正弦电能。但这只是一种理想情况。实际上发电机的磁场并不是完全按照正弦波规律分布的。因此发电机的输出电能也不是理想的正弦波,而是在基波电能上叠加了一些谐波。这种电能波形只取决于发电机本身的结构和工作情况,与外接负载无关。按照国际电工委员会(IEC)的规定,发电机输出电压的波形在任何瞬间其谐波与基波波形之差,都不得大于基波幅值的 5%,故在一般情况下可以认为发电机输出的电能为纯正弦波。由于这个概念,人们在利用市电电源时常常产生一个错误认识,认为经常使用的市电电源,除了偶尔发生断电事故外,通常是连续稳定的正弦波电能。其实不然,市电电源系统包括有数量众多的变电、输电和配电设备,它连接着成千上万个各种各样的负载,其中既有线性负载也有非线性负载。因此由于市电电源和负载的复杂性,例如市电电源容量的不足、输变电和各种各样配电设备存在的性能和质量问题、各种用电设备配置的不合理性、设备之间的相互影响,以及配电系统中广泛应用的各类非线性负载及电力半导体变流装置对市电产生的污染、大型负载设备的操作。以及自然界的雷击、地电及人为故障因素的影响等,使市电电源输出的交流电能不再是稳定的正弦波,而是使市电电源质量不断地恶化,变成了不满足用户要求的“粗电”,这种“粗电”存在着各种各样的电能质量问题,如下所示。

① 电涌(power surges)。指市电电源输出电压的有效值大于额定值的 110%,其持续时间为一个周波(20ms)至数个周波的电压变化。电涌主要是由于电网的电力变压器调压能力差,在电网上连接的大型电气设备关断时,电网因突然卸载而产生的高压冲击。

② 高压尖脉冲(high voltage spikes)。指电压峰值达到 6000V,持续时间为

0.1~10ms 的电压。高压尖脉冲主要是由于雷击、电弧放电、静电放电或大型电气设备的开关操作而产生的。

③ 暂态过电压(switching transients)。指峰值电压高达 20 000V, 持续时间在 1~100 μ s 之间的脉冲电压。产生暂态过电压的主要原因及可能造成的破坏类似于高压尖脉冲, 只是在解决方法上有些不同。

④ 电压下陷(power sag)。指市电电压的有效值小于额定电压的 80%~85% 的低压状态, 持续时间为 1 至数个周波。电压下陷主要是由于大型设备开机、大型电动机启动或大型电力变压器接入所造成的。

⑤ 电线噪声(electrical line noise)。指线路上的射频干扰(RFI)和电磁干扰(EMI)以及其他各种高频干扰。大型电动机的运行, 大型继电器的动作, 电动机控制器的控制、广播发射、微波辐射及电气风暴等都会引起线路噪声干扰。

⑥ 频率偏移(frequency variation)。指市电电源频率超过 ± 3 Hz。频率偏移主要是由于应急发电机的不稳定运行或不稳定的电源供电引起的。

⑦ 持续低电压(brownout)。指市电电压的有效值长期低于额定值, 并且持续时间较长。持续低电压产生的原因包括大型设备的启动, 主电力线切换、大型电动机启动、线路过载等。

⑧ 市电中断(power fail)。指市电供电中断, 持续时间大于两个周波至数个小时的情况。市电中断产生的原因有线路上的断路器跳闸、市电电网供电中断及故障等。

市电电源存在的上述电能质量问题, 都会使负载的故障率增加, 轻者不能运行, 重者可以引起负载设备的损坏, 甚至造成整个供电系统停电。例如对于计算机, 市电电源存在的这些质量问题既可以引起键盘锁定、硬件老化等相对较轻的故障, 也可以导致数据完全丢失, 或引起主板烧毁等较大的事故。因此, 提高市电电源的供电质量, 保证用户负载的安全可靠运行是至关重要的。为了达到这个目的, 在具有重要或精密负载的场合, 就必须采取措施对市电电源存在的电能质量问题进行补偿。

1.2 感性与非线性负载对市电质量的污染

市电电源所以被称为存在电能质量问题的“粗电”, 除了其本身的因素外, 用户端的感性和非线性负载对市电电源的污染也是一个重要原因。污染有两个方面: 一是无功功率, 二是谐波。

随着社会的发展和进步, 重要和精密负载所占的比例越来越大, 对市电电能质量的要求也越来越高。与此同时, 随着重要和精密负载的增加, 电力电子电源和变压器的应用也相应增加, 电力电子电源(如整流器, 开关电源、UPS)和变压器是市电电源的非线性负载, 它们的大量应用又给市电电源带来了严重污染, 增大了市电电能质量的恶化程度。

在工业和生活用电的负载中, 感性负载占的比例很大。例如异步电动机、变压器、