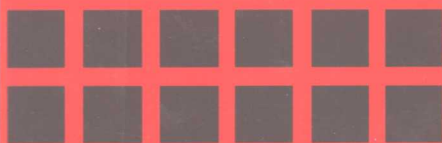
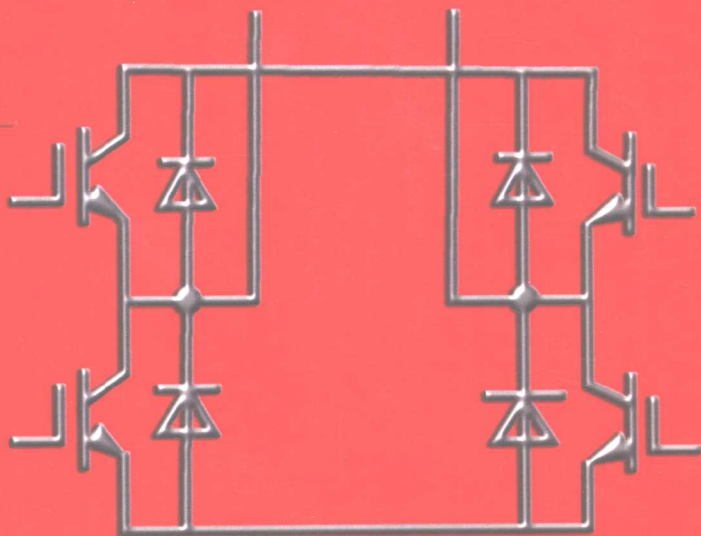
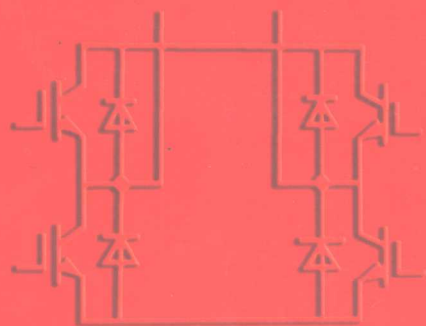


电能变换技术丛书

Delta 逆变技术 及其在交流电源中的应用

●●● 刘凤君 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电能变换技术丛书

Delta 逆变技术及其在 交流电源中的应用

刘凤君 编著



机械工业出版社

产生于 20 世纪末的 Delta 逆变技术改变了逆变器的工作方式,由作为电源应用的全功率变换,改变成只补偿变化量的部分功率变换,提高了过载能力、增大了变换效率。

本书内容包括:Delta 逆变技术及其在交流稳压电源、电力有源滤波器、电能质量综合补偿器、串并联补偿式在线 UPS 中的应用,以及 Delta 逆变器的广义软开关技术。其中重点介绍电能质量综合补偿器及串、并联补偿式在线 UPS 中的应用与工作原理,这两种电源在我国还是空白。

本书可供从事电力电子电源、交流稳压电源、电力有源滤波器、电能质量综合补偿器及 UPS 技术研究的广大科技人员阅读,也可作为大学电力电子、工业自动化等专业的高年级学生及研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

Delta 逆变技术及其在交流电源中的应用/刘凤君编

著. —北京:机械工业出版社, 2003. 9

ISBN 7-111-12256-9

I. D... II. 刘... III. 逆变器 IV. TM464

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 039523 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王 玫 版式设计:霍永明

封面设计:陈 沛 责任印制:路 琳

北京中加印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·14 印张·343 千字

0 001—4 000 册

定价:23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

电能变换技术丛书

编辑委员会

主任：蔡宣三

副主任：严仰光 牛新国 倪本来

委员：牛新国 王 玫 王 聪 毛三可

艾多文 刘凤君 刘胜利 严仰光

何湘宁 张卫平 张 立 张占松

张志国 李厚福 杨继深 沙 斐

陆 鸣 陈 坚 陈永真 陈建业

陈道炼 区健昌 赵良炳 侯振程

倪本来 倪海东 徐德鸿 崔鼎新

黄济青 龚绍文 路秋生 蔡宣三

执行主编：倪本来

责任编辑：王 玫

序

电能是当今最重要的能源形式。很难想像失去电能支撑的文明世界如何运行。在所有的动力资源中，电能使用最方便，适用范围非常广，并且是清洁的。电能变换则是用电之门，是用好电的必由之路。

供人类使用的电能都是通过一些方法生产或收集得来的。世界上绝大部分的电能来自发电站，例如水电站、火力发电厂和核电站，发电站是交流电网的源头。燃油发电机是防备电网故障或远离电网的应急和补充。风力发电、潮汐发电等是自然能与电能之间的有效转换。太阳电池是太空最理想的发电装置。燃料电池、锂离子电池、镍氢电池、镍镉电池、铅酸蓄电池等是经过电化学反应而产生电能的固定或移动式电能载体。形形色色的干电池是一次性的微小电能载体。所有称得上“电池”的都是直流电的储蓄体。

直接从电网或电池汲取的原生态的电能（姑且称之为原电）在某种意义上都是“粗电”。在大多数情况下，使用这些“粗电”都不能尽如人意，譬如电网上的电就不一定好使。电网是共用的，宏观上有高峰期和低谷期之分，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，特别是大型设备的起动和停止，足以给邻近电网造成随机的瞬时冲击和定式落差；由于雷电、风暴、炎热等自然因素造成电网扰动甚至供电瞬时中断等，都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。为此需要稳压器和 UPS 对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要小。不过电池在工作中也问题不少，最常见的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，很少以其自然形态直接拿来使用，多数是串联或串并联组合，但很难保证串联或串并联组合中的每个单体的特性一致。为此，必须实施合理的充电、放电和监控。

太阳电池用来将阳光转换成电能，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。

不管是电网、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“惹事”负载设备的电磁干扰，或 DC/DC、DC/AC 变换装置自身的电磁干扰，都能搅得“四邻不安”。

今天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、柔性输配电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。

能源问题在本世纪仍占据瞩目位置,人们追求在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动机的形式进行的,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,以控制和调节电动机的运行状态,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动机实行变频调速控制,具有很好的节电潜力。

照明用电据称占全球总体用电的 20%,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,以全新的电能变换技术装备的电子镇流器将是实现绿色照明的主要角色。

生产力越发展,技术越进步,环境问题越加突出。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的参与者,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环境少一点恶化。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,技术进步定会牵动电能变换技术需求急速膨胀。“电能变换技术丛书”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。但是电能变换技术是实用性极强的技术,服务于各种领域,内容异常丰富,丛书限于规模实难尽述。不过,我们仍然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。读者如能从“电能变换技术丛书”中得到启示,并能在自己的工作实践中获得应用,编者将足以自慰。本丛书从立意到选题到写作内容,定有不足之处,欢迎读者批评斧正。

“电能变换技术丛书”编辑委员会

前言

随着市电网污染的日益严重,以及反污染的绿色电力电子产品的发展,在最近几年,电力电子技术中出现了一种不太引人注意的应用新技术,即 Delta 逆变技术,它正在成长和发展。这项新技术,是国际上正在热研的串联、并联和串并联结构补偿电路的基础,它打开了电力电子技术为提高电能质量而在电力系统中应用的大门。

随着研究的逐渐深入,和瞬时无功理论的不完善,以 Delta 逆变器为基础的串联、并联和串并联结构补偿电路的功能和特点,已经逐渐地被人们所认识,并由此而制成的交流净化稳压电源(国外称动态电压恢复器,Dynamic Voltage Restorer—DVR)、并联补偿式交流稳压电源、串联型和并联型有源电力滤波器(Active Power Filters—APFs)、综合潮流控制器(Unified Power Flow Controller—UPFC)、电能质量综合补偿器(Custom Power)和优于传统 UPS 的串并联补偿式在线 UPS 等。这些新型的电力电子装置,有的已经商品化,如美国西屋公司的 DVR、德国西门子公司的 SIPCON-P/S(并/串)系列电能质量调节器、许多国外公司生产的串联或并联式电力有源滤波器,以及美国 APC 公司生产的串并联补偿式在线 UPS(Silicon DP300E 系列);有的已投入现场运行多年,如日本($\pm 50\text{MVA}$)和美国($\pm 100\text{MVA}$)的静止无功发生器(Static Var Generator—SVG),美国的 UPFC($\pm 160\text{MVA}$)。

基于 Delta 逆变技术和串联、并联及串并联补偿电路的这些电力电子装置,不仅仅能够全面完善和提高电力系统的性能,如动态和暂态稳定性、系统输电能力的提高、功率振荡的阻尼能力等,而且还能全面地提高配电系统的供电质量。因此,也在电力系统的安全可靠和经济运行方面发挥着重要作用。

20 世纪末及 21 世纪初,高压大容量电力半导体开关器件的飞速发展,以及其他新型场控器件的开发,必将促进 Delta 逆变技术的应用,并且也加速了高效、节能和低污染的绿色电力电子技术产业的发展进程。

Delta 逆变技术的串联、并联和串并联结构补偿电路,可以应用于输电系统,也可以应用于配电系统,两者的差别仅仅表现在容量的大小和电压的高低上。就应用的品种而言,配电系统要多于输电系统。就目前国内的情况来看,在配电系统中的应用更加急需,而且技术种类也更加全面。所以,本书将着重介绍它在配电系统中的应用,将这些应用升压、扩容后就可以应用到输电系统中。

本书的内容主要有六个部分:

- (1) 介绍 Delta 逆变技术的原理、控制法和种类;
- (2) 介绍 Delta 逆变技术在交流净化稳压电源(DVR)中的应用;
- (3) 介绍 Delta 逆变技术在电力有源滤波器(APF)中的应用;
- (4) 介绍 Delta 逆变技术在电能质量综合补偿器(Custom Power)中的应用;
- (5) 介绍 Delta 逆变技术在串并联补偿式在线 UPS 中的应用;
- (6) 介绍 Delta 逆变器的广义软开关技术。

在串联有源滤波器、并联有源滤波器、动态电压补偿器以及相关技术的研究，清华大学、西安交通大学和浙江大学等都做了很多实际工作。由于我国在动态电压补偿器、电力有源滤波器、电能质量综合补偿器、串并联补偿式在线 UPS 等的开发应用方面，尚处于起步阶段。我写此书的目的在于普及知识，推动和加速开发应用的进程，起到抛砖引玉的作用。由于水平有限，书中内容难免有不足和错漏之处，敬请广大读者批评指正，在此表示衷心的感谢！

编著者 刘凤君

2003 年 6 月 15 日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1	3.2.2 对市电电压波动值 $\pm \Delta u$ 和谐波 u_h 的 补偿	41
1.1 市电网的电能质量问题	1	3.2.3 开关整流器的功能和补偿的能量传输	42
1.2 谐波和无功功率的产生	2	3.2.4 Delta 逆变器的型式与 Tr 的电压比	43
1.3 无功功率的影响和谐波的危害	3	3.3 单相 Delta 逆变器式并联补偿交流净 化稳压电源	44
1.3.1 无功功率的影响	3	3.4 单相 Delta 逆变器式串并联补偿交流 净化稳压电源	46
1.3.2 谐波的危害	4	3.5 标准交流正弦波基准电源	47
1.4 市电网对谐波电压和谐波电流的 限值	5	3.5.1 直流稳压电源	48
1.5 无功功率补偿与谐波抑制	6	3.5.2 功率放大电路	48
第 2 章 Delta 逆变器的构成和工作原理	7	3.5.3 稳幅驱动电路	49
2.1 单相 PWM 主逆变电路	7	3.5.4 50Hz 输入波形信号的产生与报警电路	50
2.2 载波为三角波的三相 PWM 主逆变电 路	12	3.6 三相 Delta 逆变器式交流净化稳压电 源	50
2.3 三相全桥和三相四桥臂 PWM 逆变器	19	3.6.1 市电电压增量的检测	51
2.4 单个 PWM 逆变器的电压型与电流型 电路型式	20	3.6.2 三相 SPWM 开关整流器	55
2.5 逆变器的控制方式	21	3.6.3 三相 Delta 逆变器的补偿作用	60
2.5.1 瞬时值滞环比较方式	21	3.6.4 三相 Delta 逆变器式交流净化稳压电源 的其他型式电路	61
2.5.2 三角波比较	22	3.7 国外研究和应用情况	74
2.6 Delta 逆变器的双向四象限工作及其 特点	23	第 4 章 Delta 逆变器式电力有源滤波 器	78
2.6.1 直流侧电压的调节关系	24	4.1 有源滤波器的构成与基本工作原理	78
2.6.2 直流侧电流 i_d 及电压 U_d 的波动	25	4.2 采用波形比较法的电压型并联有源滤 波器	79
2.6.3 逆变器同步工况	25	4.2.1 Delta 补偿器的数学模型	80
2.6.4 Delta 逆变器的特点	26	4.2.2 电感 L 的值	81
2.7 电压和电流增量的检测电路	27	4.2.3 控制方式	83
2.7.1 瞬时无功理论检测法	27	4.3 采用干扰抵消法的电压型并联有源滤 波器	84
2.7.2 自适应检测法	33	4.4 并联有源滤波器与 LC 滤波器的混合 应用	86
第 3 章 Delta 逆变器式交流净化稳压 电源	37	4.5 注入电路的方式	87
3.1 电压瞬时值比较增量检出法	37		
3.2 单相 Delta 逆变器式串联补偿交流净 化稳压电源	38		
3.2.1 对市电电压波动值 $\pm \Delta u$ 的补偿	39		

4.6 电压型串联有源滤波器	89
4.7 有源滤波器的主电路形式	90
4.7.1 单个 Delta 逆变器的电路形式	90
4.7.2 多重叠加主电路型	91
4.8 实际使用的三相并联有源滤波器	92
4.8.1 主电路的容量与开关器件的选择	93
4.8.2 电流 $i_q + i_h$ 检出电路与直流电压控制	93
4.8.3 检测电流的提取点与控制方式	96
4.8.4 与 LC 无源滤波器混合使用的并联 有源滤波器	98
4.9 实际使用的三相串联有源滤波器	102
4.9.1 单独使用的串联有源滤波器工作原 理	102
4.9.2 串联混合型有源滤波器	104
4.10 有源滤波器的应用	113
4.10.1 三相单独使用并联有源滤波器的几 种不同的应用电路	113
4.10.2 三相单独使用串联有源滤波器的几 种不同应用电路	116
4.10.3 元件参数、经济考虑和类型选择	118
第 5 章 电能质量综合补偿器	119
5.1 市电电网存在的严重电能质量 问题	119
5.2 负载的多样性与串并联补偿技术	120
5.3 单相电能质量综合补偿器电路	122
5.3.1 综合补偿器对市电电压的补偿	122
5.3.2 综合补偿器对负载无功与谐波电流 的补偿	126
5.3.3 对市电电压波动补偿过程中 Delta 逆 变器 I 和 II 的工作状态	128
5.3.4 Delta 逆变器 I 和 II 的补偿容量	129
5.4 三相电能质量综合补偿器电路	130
5.4.1 组成与工作原理	130
5.4.2 Delta 逆变器 I 的补偿原理	133
5.4.3 Delta 逆变器 II 的补偿原理	136
5.4.4 SPWM 脉冲形成控制电路	142
5.4.5 对市电电压波动补偿时逆变器 I 和 II 的工作状态	143
5.4.6 Delta 逆变器 I 和 II 的补偿容量	144
5.4.7 试验波形	145
5.4.8 检测电流的取法	147
5.5 采用三相全桥或三相四桥臂逆变器 的三相电能质量综合补偿器	148

5.6 电能质量综合补偿器的特点	152
第 6 章 串并联补偿式在线 UPS	155
6.1 传统 UPS 的缺点及串并联补偿式电 路的采用	155
6.2 单相串并联补偿式在线 UPS 电路	156
6.2.1 Delta 逆变器 I 的工作与控制方式	157
6.2.2 Delta 逆变器 II 的工作与控制方式	160
6.2.3 Delta 逆变器 I 和 II 对市电电压波动 补偿时的工作状态	162
6.2.4 负载所需无功与谐波电流的供给	164
6.2.5 市电掉电时由 Delta 逆变器 II 提供 100% 的功率	164
6.2.6 Delta 逆变器 I 和 II 的补偿容量	164
6.3 三相串并联补偿式在线 UPS 电路	165
6.3.1 三相 UPS 的电路构成和各部分功 能	166
6.3.2 Delta 逆变器 I 的工作与控制方式	170
6.3.3 Delta 逆变器 II 的工作与控制方式	177
6.3.4 Delta 逆变器 I 和 II 对市电电压波动 补偿时的工作状态	180
6.3.5 Delta 逆变器 I 和 II 的补偿容量	182
6.3.6 试验波形	183
6.3.7 市电采用三相四线制或三相三线制 电网供电时的工作	185
6.3.8 检测电流的取法	186
6.4 采用三相全桥式或三相四桥臂逆变 器的三相串并联补偿式在线 UPS	187
6.4.1 对负载电压检测电路	188
6.4.2 对负载电流的检测电路	189
6.4.3 采用三相全桥逆变器的在线 UPS 电 路	189
6.4.4 采用三相四桥臂逆变器的在线 UPS 电路	191
6.5 串并联补偿式在线 UPS 的特点	195
6.5.1 与传统 UPS 在电路组成和结构上的 区别	195
6.5.2 串并联补偿式在线 UPS 的功能特 点	197
6.5.3 串并联补偿式在线 UPS 所能达到的 指标	198
6.5.4 不同类型的 UPS 对市电网及负载 的适应能力	198
6.5.5 串并联补偿式在线 UPS 技术的所属 类型、效率特性及应用范围	199

第 7 章 广义软开关技术及其在 Delta 逆变器中的应用 202

7.1 用缓冲电路使开关软化 202

7.1.1 关断缓冲电路 202

7.1.2 开通缓冲电路 203

7.2 LCD 关断无源无损缓冲电路 204

7.3 有源无损缓冲电路 208

7.4 采用互感原理的无源无损缓冲电路 ... 209

7.4.1 开通缓冲 210

7.4.2 关断缓冲 210

7.5 采用互感原理的有源无损缓冲电路 ... 210

参考文献..... 212

第 1 章 绪 论

Delta 逆变技术,是最近几年才出现的一项新技术。Delta 意即物理量的增量,所谓 Delta 逆变技术,就是用电压或电流中的增量进行调制的逆变技术,也就是用电压或电流这两个物理量中的增量作为调制波指令信号,对线性 PWM 逆变器进行控制,并使逆变器能够按比例地复现增量的数值和波形的一种逆变技术。所谓电压或电流增量,是指市电电压的波动 Δu 和谐波分量 u_h ,负载电流中的无功分量 i_q 和谐波分量 i_h 。这项技术是专为满足市电电压净化稳压、负载电流的无功补偿和有源滤波的需要而发展起来的,是很有前途的一项逆变技术。

1.1 市电电网的电能质量问题

由于市电电网和负载的复杂性,例如市电电网容量的不足、输变电和各种配电设备的性能和质量问题、各用电设备配置的不合理性、设备之间的相互影响,以及配电系统中各类非线性负载的增加、电力半导体变流装置的广泛应用等因素,以及自然界的雷击、地电及人为因素的影响,电网输出的交流电并不是稳定的正弦波,而是使供电质量不断恶化,存在各种供电质量问题。例如:

- 电压浪涌(power surges):指市电电网输出电压有效值大于额定值 110%,其持续时间为一个周波(20ms)至数个周波的电压变化,主要是由于电网的电力变压器调压能力差,大型电气设备突然断开而产生的电压冲击。
- 高压尖峰脉冲(high voltage spikes):指电压峰值达 6000V,持续时间从 1ms 至数个周波范围的电压尖峰。主要是由雷击、电弧放电、静态放电、大型电气设备的开关操作引起的。
- 暂态过电压(switching transients):指峰值电压高达 20000V,持续时间从 $1\mu\text{s}$ 至 $100\mu\text{s}$ 的脉冲电压,主要仍是由雷击、尖端放电、大型电气设备瞬时动作产生的。
- 电压下陷(power sag):指电压有效值小于额定值的 80% 至 85% 之间的低压状态,持续时间为一个周波(20ms)至数个周波,主要是由大型设备、大型电动机起动,或大型电力变压器的接入造成的。
- 线路噪声(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。大型电动机运行、大型断路器动作、广播发射、微波辐射等均会引起线路电噪声干扰。
- 频率偏移(frequency variation):指电网频率超过 $\pm 3\text{Hz}$ 以上,主要是由应急柴油发电机、水力发电机等不稳定运行引起的。
- 持续低电压(brownout):指电网电压有效值长期低于额定值。主要是由大型设备运行、主电力切换、线路过载等引起的。
- 市电中断(power fail):指电网供电中断,持续时间大于两个周波至数小时。主要是电网

的断路器跳闸、市电供电中断、电网故障等。

根据 IBM 公司所作的一项研究表明,通常一台计算机平均每月会遇到 120 次电源问题。电源问题既可以引起键盘锁定、硬件老化等相对较轻的不良影响,也可能导致数据完全丢失或主板烧毁等较大事故。根据 Yankee Group 所作的调查,大约半数接受调查的公司,因为电源问题造成的损失在每小时 1000 美元以上,而 9% 的公司估计他们的损失会高达每小时 50000 美元以上。在造成损失的电源问题中,停电占 20%,其他是因为电源质量造成的。

1.2 谐波和无功功率的产生

在工业和生活用电负载中,阻感性负载占有很大比例。例如异步电动机、变压器、荧光灯等,都是典型的阻感性负载。异步电动机和变压器所消耗的无功功率以及电抗器所消耗的无功功率占有很大的比例。含有电感的阻感性负载,必须吸收无功功率才能工作,这是由其本性决定的。

电力电子装置和变压器等非线性装置,也消耗无功功率。特别是相控整流器、相控交流功率调整电路和周波变流器等相控装置,在工作时基波电流滞后于电压,要消耗大量的无功功率。此外,这些相控装置也会产生大量的谐波电流,一般来说,谐波源都是要消耗无功功率的,如二极管整流电路,虽然基波电流的相位和电压大致相同,似乎不消耗基波无功功率,但它产生的大量谐波电流也要消耗一定的无功功率。

市电网中的谐波,主要是由各种电力电子装置(包括家用电器、计算机等的电源部分),变压器、荧光灯等产生的。变压器的谐波电流是由其励磁回路的非线性引起的。由于变压器铁心的磁化曲线是非线性的,所以产生正弦磁通的励磁电流只能是非正弦的。励磁电流波形发生扭曲,不再是 $1/4$ 周对称的波形,但仍是正、负半周对称的波形,含有以 3 次谐波为主的奇次谐波。

对于三相变压器,其励磁电流和铁心结构、变压器联结方式有关。如变压器采用 Dy 联结,则可以为 3 的整倍次谐波提供通路,使磁通和电动势都接近正弦,3 的整倍次谐波只在 D 回路中流通,不流入市电网,流入电网的只是 $6k \pm 1$ (k 为正整数)次谐波。如变压器不采用 Dy 联结,则励磁电流中就没有 3 的整倍次谐波电流,这时由于磁化曲线的非线性,就会在磁通中产生 3 的整倍次谐波,使磁通变为平顶波。在三心柱变压器中,磁动势里 3 的整倍次谐波是各相同相位的,因此这些谐波磁通的路径必须是由空气及变压器外壳构成的回路,磁阻很大,使 3 的整倍次谐波的磁通仅为独立铁心时的 10% 左右,因此磁通和电动势仍然接近于正弦波。

变压器励磁电流的谐波含量和铁心的饱和程度直接相关,即和所加的电压有关。正常情况下,所加的是额定电压,铁心工作在线性范围内,谐波电流含量不大。但在轻载时电压升高,铁心饱和,谐波电流含量就会大大增加。此外,在变压器投入运行过程、暂态扰动、负载剧烈变化及非正常状态运行时,都会产生大量谐波。

荧光灯的伏安特性是严重非线性的,因此也会引起严重的谐波电流,其中 3 次谐波含量最高。当多个荧光灯接成三相四线负载时,中性线中就会流过很大的 3 次谐波电流。如果每个荧光灯还接有补偿无功功率的电容时,则 3 次谐波还可能引起谐振而使谐波放大,使电压波形也发生严重畸变。

30 多年来,电力电子装置的应用日益广泛,也使得电力电子装置成为最大的干扰源,尤其

是整流装置,所占的比重最大。常用的整流电路几乎都采用晶闸管相控或二极管整流电路,其中以三相和单相桥式整流电路为最多。不论是带阻感负载的整流电路,还是直流侧采用电容滤波的二极管整流电路,都是严重的谐波污染源。不仅仅给电网造成严重污染,也使总的功率因数降低。此外,逆变器、直流斩波器和间接 DC-DC 变换器的应用也较多。这些装置中的整流电路也存在着严重的谐波和无功功率问题。在这类装置中,各种开关电源、UPS 和电压型变频器的用量也越来越多,对电网的污染也越来越大。特别是数量庞大的电视机、个人电子计算机和各种家用电器及办公设备,其内部大都含有开关电源,它们的普及所带来的谐波污染问题也是非常严重的。

很多文献指出,上述各种谐波源是谐波电流源,其所产生的谐波电流取决于谐波源本身的特性,基本上与市电网的参数无关。如大量广泛使用的直流侧为阻感负载的整流电路,其谐波电流是由直流电流和各半导体开关的切换方式所决定的,和交流电压几乎无关。但是电容滤波的二极管整流电路,就不是谐波电流源,因其直流电压近似为恒定值,直流电压通过各半导体开关的切换加到交流侧,所以应看成是谐波电压源。在各种家用电器中大量使用的开关电源及变频器中,都大量地采用这种电容滤波的二极管整流电路,因此必须给予足够的重视。谐波电压源和谐波电流源的分析方法,谐波治理方法都有很大的不同,这也必须注意。

1.3 无功功率的影响和谐波的危害

1.3.1 无功功率的影响

基波无功功率对市电网的影响有以下几个方面:

(1)增大了设备的容量:无功功率的增加,将导致电流增大和视在功率的增加,从而使发电机、变压器及其他送配电设备的容量和导线容量增加。同时也使用户的起动和控制设备、测量仪表的尺寸和规格加大。

(2)设备和线路损耗增加:无功功率的增加,使总电流增大,因而使设备及线路损耗增加,这是很显然的。假定线路总电流为 $I = I_p + I_q$,线路电阻为 R ,则线路损耗 ΔP 为

$$\Delta P = I^2 R = (I_p^2 + I_q^2) R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R$$

式中的 $(Q^2/U^2)R$ 这一部分损耗就是由无功功率引起的。

(3)使线路及变压器的电压降增大:如果是冲击性无功功率负载,还可能使电压产生剧烈波动,供电质量严重降低。

图 1-1a 是一个电源系统和负载的等效电路,图 1-1b 是其相量图。

从图中可以看出, Z_s 引起的电压降 ΔU 为

$$\Delta \dot{U} = \dot{E} - \dot{U} = Z_s \dot{I}$$

此外,负载电流 I 可由下式求出:

$$\dot{I} = U(G - jB) = \frac{U^2 G - jU^2 B}{U} - \frac{P - jQ}{U}$$

将此式代入上式,得

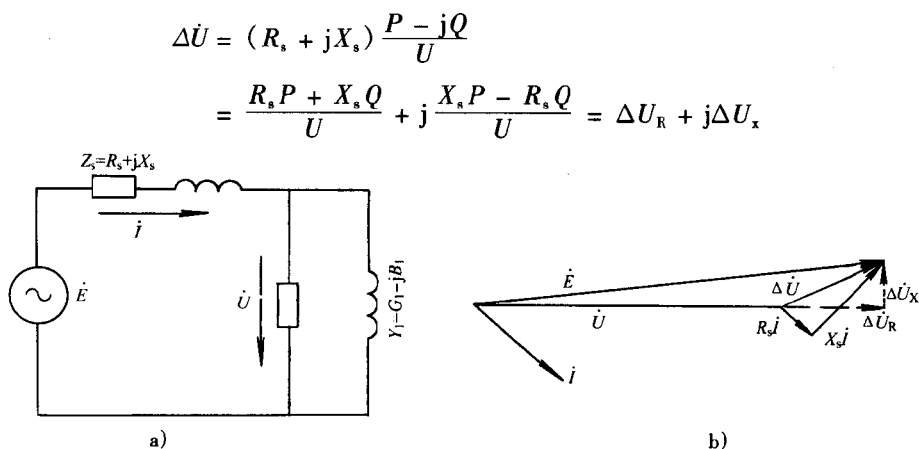


图 1-1 电源系统和负载的等效电路与相量图

a) 等效电路 b) 相量图

从图 1-1b 可以看出, $\dot{E}$ 和 $\dot{U}$ 之间的夹角很小, 因此

$$\Delta U \approx \Delta U_R = \frac{R_s P + X_s Q}{U}$$

在市电网中, R_s 比 X_s 小得多, 因此可以得出这样的结论: 有功功率的波动一般对市电压的影响较小, 市电压的波动主要是由无功功率的波动引起的。电动机在起动期间的功率因数很低, 这种冲击性无功功率会使市电压剧烈波动, 甚至使接在同一市电网上的用户无法正常工作。大型设备的电动机频繁起停产生的无功功率冲击, 将会严重影响市电网的供电质量。

1.3.2 谐波的危害

理想的市电网提供的电压, 应该是单一而固定的频率以及规定的电压幅值。谐波电流和谐波电压的产生, 对市电网是一种污染, 它将使用电设备所处的环境恶化, 也对周围的通信系统和市电以外的设备带来危害。近几十年来, 各种电力电子装置的迅速普及使得市电网的谐波污染日益严重, 由谐波引起的各种故障和事故也不断发生, 谐波危害的严重性已引起人们的高度关注。谐波对市电网和其他系统的危害大致有如下几个方面:

(1) 谐波使市电网中的元件产生了附加的谐波损耗, 降低了发电、输电和用电设备的效率, 大量的 3 次谐波电流流过中性线时会使线路过热, 甚至发生火灾。

(2) 谐波影响各种电气设备的正常工作。谐波对电机的影响除引起附加损耗外, 还会产生机械振动、噪声和过电压, 使变压器铁损增大可能出现局部严重过热。谐波使电容器、电缆等设备过热、绝缘老化、寿命缩短, 以至损坏。

(3) 谐波会引起市电网中局部的并联谐振和串联谐振, 从而使谐波放大, 这就使(1)和(2)的危害大大增加, 甚至引起严重事故。

(4) 谐波会导致继电保护和自动装置的误动作, 并会使电气测量仪表计量不准确。

(5) 谐波会对邻近的通信系统产生干扰, 轻者产生噪声, 降低通信质量; 重者导致信息丢失、使通信系统无法正常工作。

1.4 市电网对谐波电压和谐波电流的限值

由于市电网中的谐波电压和谐波电流对用电设备和电网本身都会造成很大的危害,世界上许多国家都发布了限制电网谐波的国家标准,或由权威机构制定的限制谐波的规定。制定这些标准和规定的基本原则是限制谐波源注入电网的谐波电流,把电网谐波电压控制在允许范围内,使在电网中的电气设备免受谐波的干扰而能正常工作。

各国制定的谐波标准是比较接近的。我国原水利电力部于1984年根据原国家经济委员会批转的《全国供用电规则》的规定,制定并发布了SD126-84《电力系统谐波管理暂行规定》。国家技术监督局于1993年又发布了中华人民共和国国家标准GB/T14549-1993《电能质量 公用电网谐波》,该标准从1994年3月1日起开始实施。

对于不同电压等级的公用电网,允许电压谐波畸变率也不相同。电压等级越高,谐波限制越严格。另外,对偶次谐波的限制也要严于对奇次谐波的限制。表1-1给出了公用电网谐波电压限值。

表 1-1 公用电网谐波电压(相电压)限值

电网标称电压/kV	电压总谐波畸变率 (%)	各次谐波电压含有率(%)	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

公用电网公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量(方均根值),不应超过表1-2中规定的允许值。

表 1-2 注入公共连接点的谐波电流允许值

标准 电压/ kV	基准短 路容量/ MVA	谐波次数及谐波电流允许值/A																								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12	
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8	
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1	
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5	
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6	
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.0	2.4	4.3	2.0	3.7	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9	

当公共连接点处的最小短路容量不同于基准短路容量时,可以按下式修正表1-2中的谐波电流允许值。

I_n = S_k1 / S_k2 * I_hp

式中 S_k1——公共连接点的最小短路容量(MVA);

S_k2——基准短路容量(MVA);

I_hp——表1-2中第n次谐波电流的允许值(A);

I_n ——短路容量为 S_{kl} 时的第 n 次谐波电流的允许值(A)。

1.5 无功功率补偿与谐波抑制

无功功率补偿与谐波抑制的研究是极其重要的,它对电力电子技术的发展是有很大影响的。电力电子技术是未来科学技术发展的重要支柱。有人预言,电力电子连同运动控制将和计算机技术一起成为未来最重要的两大技术。然而,随着电力电子技术的发展,电力电子装置所消耗的无功功率和所产生的谐波污染已成为电力电子技术发展的重大障碍,这就迫使电力电子领域的研究人员,必须对无功功率和谐波问题进行更有效的研究和解决。

解决电力电子装置和其他负载的无功功率和谐波污染问题的基本思想有两条:一条是装设无功功率与谐波补偿装置,如有源无功补偿与滤波器;另一条是对电力电子装置进行本身改造,使其不产生谐波,且功率因数可控制为 1,例如采用串并联结构的用户电能质量综合补偿器与在线 UPS 等。而无功补偿与电力有源滤波器、用户电能质量综合补偿器和串并联结构的在线 UPS 等,都是采用 Delta 逆变技术制成的。

Delta 逆变技术是最近几年来为了满足市电交流电压的净化和稳压、电流的无功补偿与有源滤波、电能质量综合补偿和在线 UPS 的发展需要而出现的一种逆变技术。利用 Delta 逆变技术,可以制成高质量的无功补偿器或电力有源滤波器。用 Delta 逆变技术制成的电能质量综合补偿器与串并联结构的在线 UPS,既可以得到高质量的电源,也消除了市电与负载之间的谐波相互干扰,使输入功率因数等于 1。所以有人说,Delta 逆变技术和串并联结构,是对电力电子装置(如 UPS 等)自身进行改造的典范和有力武器。