



电源系列

工频与高频 三相绿色 UPS电路

◎ 刘凤君 编著

POWER



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电源系列

工频与高频三相 绿色 UPS 电路

刘凤君 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书首先介绍了各种工频与高频 UPS 的主要组成部分所用的各种 SCR 多相相控整流器, 各种 IGBT SPWM PFC 高频开关整流器, 各种 IGBT SPWM 逆变器的电路形式与工作原理, 各种 UPS 用交、直流滤波器的电路形式与工作原理。然后介绍了几种工频与高频 UPS 的典型电路的构成形式与工作原理, 并对它们的特性与优缺点进行了比较与评述。此外还介绍了 UPS 高频化的最佳方式——并联级联叠加法。

本书特点: 内容新、技术新, 加入了数学分析法。

本书适合于高校自动化专业与电力电子技术专业的大学生、研究生和大学教师, 以及从事电力电子技术、UPS 技术研究的专业技术人员, 生产厂家的科技人员, UPS 应用的专职人员和维护人员阅读。

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

工频与高频三相绿色 UPS 电路/刘凤君编著. —北京: 电子工业出版社, 2011. 4
(电源系列)

ISBN 978 - 7 - 121 - 13085 - 4

I. ①工… II. ①刘… III. ①不停电电源 - 电源电路 - 基本知识 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 038814 号

策划编辑: 张 榕

责任编辑: 谭丽莎

印 刷: 北京市李史山胶印厂
装 订:

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: 787 × 1092 1/16 印张: 26 字数: 914 千字

印 次: 2011 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 59.00 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 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前言

所谓 UPS 不间断电源，就是内部有储能蓄电池，并以整流器和逆变器为主要组成部分，用于把有供电间断、电压波动大、污染严重的市电电源变换成没有间断和污染的高质量交流电能的一种稳压、稳频、静止式电力电子电源设备，以对重要部门、重要用户和重要负载供电。

在今后相当长的一段时间内，市电电源的质量不会变好，只会变坏，而随着我国国民经济的高速发展与计算机的普及，对电能质量要求高的单位和用户会越来越多；用户对电能质量的要求也会越来越高。因此，UPS 作为唯一一种能不间断提供稳压、稳频、高质量、纯净化电能的交流电源越来越成为人们关注的焦点。

用电设备在发展，UPS 电源也在发展。究竟开发研制什么样的 UPS 电源才能跟得上时代的要求就成了我们当前应该考虑的关键问题。

因为 21 世纪是一个环保节能的世纪，所以环保节能式 UPS 就成了今后的发展方向。所谓的环保节能式 UPS，就是对市电和负载及周围环境的谐波污染小、变换效率高、体积与质量小、价格便宜、可靠性高、寿命长的 UPS。UPS 对市电电源、负载和周围环境的污染和能量损耗，与 UPS 的电路形式和开关的工作方式有关。例如，高频 UPS 比工频 UPS 产生的谐波少，变换效率高；软开关比硬开关产生的谐波少，开关损耗小。因此，实现 UPS 环保节能的方法有两个：一是选择合适的整流与逆变电路形式；二是采用软开关和高频低损耗的 IGBT 开关器件，以减少谐波含量和开关损耗。

当前的 UPS 分为工频 UPS 与高频 UPS 两种。减少工频 UPS 谐波含量的办法有两种：一是用市电输入整流变压器或用谐波注入法提高 SCR 多相相控整流器的相数；二是用高频 PFC 整流器取代 SCR 工频相控整流器，即所谓的工频整流器高频化。对于高频 UPS 而言，减少其谐波含量的办法也有两种：一是提高 UPS 的开关频率，此法的优点是可以减少低次谐波的含量，缺点是开关损耗大，容易产生高频效应（如集肤效应，使电路损耗增大），使电容、电感发生质变，影响软开关工作，同时消谐波力度也比较小；二是并联级联叠加法。此法的优点是不产生高频效应，也不增加开关损耗，并可以把消谐波的力度提高 N 倍。此法同时还会带来一些正面的影响，因此它成为 UPS 实现绿色革命的最强有力的方法之一。

此外，将级联叠加与 SPWM 控制移到直流电源上进行也是 UPS 实现绿色革命最强有力的方法，此法可以大大减少开关元器件的数目，使逆变开关自然地工作在 ZVS 状态，并可以将开关损耗减少 50% 以上。

本书共分 6 章，主要内容如下。

第 1 章：主要介绍一些与 UPS 有关的入门知识。

第 2 章：主要介绍 UPS 用 IGBT 三相 SPWM 逆变器的各种电路形式和工作原理。

第 3 章：主要介绍 UPS 用 SCR 多相相控工频整流器。

第 4 章：主要介绍 UPS 用 IGBT 三相 SPWM 高频整流器的各种电路形式和工作原理。

第 5 章：主要介绍 UPS 用交流低通滤波器。



第 6 章：主要介绍现代绿色 UPS 的一些典型电路。

本书的编写具有以下特点：突出了环保节能，内容新、技术新；采用了物理概念、图表及数学分析相结合的分析方法，以使读者能够全面、系统地了解各种 UPS 电路的组成特点和工作原理。

由于编写时间较短，书中难免有不足或错误之处，敬请广大读者批评指正。

编著者
于航天二院

目 录

第1章 绪论	1
1.1 UPS 的定义、作用与分类	1
1.2 UPS 的组成与工作原理	3
1.3 UPS 的应用场合、负载性质及电流峰值系数	6
1.4 UPS 的性能指标	8
1.5 UPS 的发展过程、发展方向与某些相关概念的说明	10
1.6 PWM 脉宽调制技术	16
1.7 UPS 所用的开关器件	22
1.7.1 晶闸管	22
1.7.2 绝缘栅双极晶体管	25
1.7.3 UPS 用开关器件的选择	27
1.8 整流器的市电输入功率因数与功率因数校正技术	29
1.9 UPS 的控制技术	30
第2章 IGBT 三相 SPWM 逆变器	31
2.1 IGBT 三相 SPWM 逆变器的定义、发展过程、现状和分类	31
2.2 IGBT 三相 SPWM 逆变器的基础知识	32
2.2.1 单相两电平 SPWM 逆变器	32
2.2.2 单相三电平 SPWM 逆变器	40
2.2.3 用移相叠加法得到三电平 SPWM 波	45
2.3 三相半桥式 SPWM 逆变器	48
2.3.1 三相半桥式 SPWM 逆变器的构成与工作原理	48
2.3.2 死区对输出电压的影响	52
2.3.3 对死区影响的补偿	59
2.4 不平衡与非线性负载引起的脉动电流及其补偿	60
2.4.1 对三相三线制逆变器引起的脉动电流及其补偿	61
2.4.2 对三相四线制逆变器引起的脉动电流及其补偿	65
2.5 三相半桥式 SPWM 逆变器的节能控制法	71
2.6 三相四桥臂 SPWM 逆变器	76
2.7 IGBT 三相 SPWM 逆变器的并联级联叠加	80
2.7.1 三相 SPWM 逆变器载波三角波移相的输出电压表示式	80
2.7.2 三相 SPWM 逆变器的并联叠加	84
2.7.3 三相 SPWM 逆变器的线电压级联叠加	87
2.8 三相半桥式 VSV-PWM 逆变器	89
2.8.1 三相半桥式 SPWM 逆变器的电压空间相量表示	89
2.8.2 三相半桥式 SPWM 逆变器 VSV-PWM 的状态空间调制作图法	94



2.9 三相四桥臂 VSV-PWM 逆变器	97
2.9.1 三相四桥臂逆变器的电压空间相量	97
2.9.2 三相四桥臂逆变器的空间相量控制	100
2.9.3 使用滞后比较器的瞬时空问电流相量控制法	105
2.10 三相全桥式 SPWM 逆变器	110
2.11 独立 SPWM 直流电源级联叠加式多电平逆变器	113
2.11.1 独立直流电源的级联叠加	114
2.11.2 独立 SPWM 直流电源级联叠加式多电平逆变器的构成	117
2.12 2^{N-1} 二进制多电平逆变器	122
2.12.1 2^{3-1} 二进制二极管级联叠加式 15 电平逆变器	122
2.12.2 2^{4-1} 二进制二极管级联叠加式 30 电平逆变器	129
2.12.3 采用变压器叠加的 2^{N-1} 二进制级联叠加式多电平逆变器	134
2.13 采用变压器叠加的 2H 桥 3^{N-1} 三进制级联叠加式多电平逆变器	139
2.13.1 两个 2H 桥 3^{2-1} 三进制级联叠加式 9 电平逆变器	140
2.13.2 3 个 2H 桥 3^{3-1} 三进制级联叠加式 27 电平逆变器	145
2.14 三相 Y- Δ 级联叠加式 U_{dc} -PWM 逆变器	148
2.15 Boost SPWM 逆变器	156
第 3 章 SCR 多相相控工频整流器与三相 Boost 单开关 SPWM PFC 整流器	164
3.1 SCR 多相相控工频整流器的定义、分类及特点	164
3.2 市电输入多相整流变压器的构成与原理	165
3.3 多电平阶梯波的谐波分析新方法	169
3.4 变幅值 12 相二重叠加整流器	169
3.5 变幅值 18 相三重叠加整流器	172
3.6 变幅值 24 相四重叠加整流器	174
3.7 谐波注入式 SCR 相控 12 相整流器	177
3.7.1 采用平衡电感次级注入谐波的 SCR12 相整流器	177
3.7.2 采用变压器注入谐波的 12 相二极管整流器	179
3.7.3 输入变压器接法对谐波电流的影响	182
3.7.4 12 相整流与无源、有源滤波器在 UPS 中的应用	184
3.8 多相整流特性对比及负载对输入 PF 的影响	187
3.9 三相 Boost 单开关 SPWM PFC 整流器	188
3.9.1 谐波注入式三相 Boost 单开关 SPWM PFC 整流器	192
3.9.2 变频 PWM 控制的三相单开关 Boost PFC 整流器	197
3.9.3 固定开关频率与可变开关频率 PFC 整流器的比较	199
3.9.4 两个三相单开关 Boost SPWM PFC 的交错并联	201
3.10 对 SCR 多相相控整流器与三相 Boost 单开关 PFC 整流器的评述	202
第 4 章 IGBT 三相 SPWM 高频整流器	203
4.1 IGBT 三相 SPWM 高频整流器的定义、分类与特点	203
4.2 IGBT 三相 SPWM 高频整流器的基础知识	204
4.2.1 单相 Boost SPWM PFC 电路	204
4.2.2 单相 Buck SPWM PFC 电路	209
4.3 单相电压型 Boost 与电流型 Buck SPWM 高频整流器	214
4.3.1 单相电压型 Boost IGBT SPWM 高频整流器	214
4.3.2 单相电流型 Buck IGBT SPWM 高频整流器	224
4.4 三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器	225

4.4.1	三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器的工作原理	225
4.4.2	三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器的参数计算	234
4.4.3	三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器的节能控制法	237
4.4.4	三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器的一些常用控制方法	242
4.4.5	三相六开关电压型 Boost SPWM 高频整流器的并联叠加技术	246
4.5	三相六开关电流型 Buck SPWM 高频整流器	252
4.5.1	电流型 Buck SPWM 高频整流器与电压型 Boost SPWM 高频整流器的对偶性	252
4.5.2	一种三相六开关电流型 Buck SPWM 高频整流器	254
4.5.3	另一种节能型三相六开关电流型 Buck SPWM 高频整流器	261
4.5.4	三相六开关电流型 Buck SPWM 高频整流器的并联叠加技术	266
4.6	三相三交流开关高频整流器	269
4.6.1	三相三交流开关 SPWM 控制的 Y 形接法与 Δ 形接法高频整流器	270
4.6.2	滞环控制的典型三相三交流开关 Δ 形连接 Boost 高频整流器	276
4.6.3	三相三交流开关三电平 Boost 高频整流器	281
4.7	三相三直流开关 Boost/Buck SPWM 高频整流器	284
4.7.1	三相三直流开关转输电感式 Boost SPWM 高频整流器	284
4.7.2	三相三直流开关 Buck SPWM 高频整流器	286
4.7.3	单极性 SPWM 转输电感式 Boost 高频整流器	286
4.8	三相六直流开关单向 Boost SPWM 高频整流器	292
4.9	单相 PSC-PWM Boost PFC 并联叠加式三相整流器	297
4.10	对 IGBT 三相 SPWM 高频整流器的评述	301
第 5 章	交流低通滤波器	305
5.1	引言	305
5.2	交流低通滤波器的二端口网络理论	305
5.2.1	T 形与 Π 形二端口网络(常 K 型)	308
5.2.2	Γ 形二端口网络	310
5.2.3	常 K 型 LC 交流低通滤波器的应用电路	312
5.3	使逆变器稳定工作的 Γ 形低通滤波器	318
5.3.1	工作于线性负载的 Γ 形低通滤波器	319
5.3.2	由输入阻抗与负载变化无关来确定 L 、 C 的值	321
5.3.3	由减少谐波含量来确定 L 、 C 的值	321
5.3.4	由逆变器输出伏安容量来确定 L 、 C 的值	323
5.3.5	当 UPS 有输出变压器时滤波器参数 L 、 C 的确定	324
5.4	感性负载时的滤波器特性	328
5.5	谐振式与并联谐振交流低通滤波器	329
5.6	Γ 形与并联谐振交流低通滤波器的比较及输出电路的优化设计	332
5.7	串联谐振交流低通滤波器	334
5.8	噪声滤波器	338
5.9	高频交流电感、滤波电感和储能电感的设计	340
第 6 章	现代绿色 UPS 电路	345
6.1	当前 UPS 的现状 & 两种 UPS 电路的结构形式	345
6.2	提高市电输入功率因数的工频 UPS	353
6.3	无变压器高频 UPS	357
6.3.1	三相半桥式 Boost SPWM PFC 高频整流器	359
6.3.2	三相半桥式 SPWM 高频逆变器	364
6.3.3	高频 UPS 存在的问题与级联叠加法	365



工频与高频三相绿色 UPS 电路

6.4	不对称负载补偿式串、并联补偿式 UPS	368
6.5	Buck-Boost 变换器式串、并联补偿 UPS	379
6.6	直流电源级联叠加式 UPS	386
6.6.1	直流电源 PSC-PWM 级联叠加式 UPS	386
6.6.2	直流电源二进制(2^{N-1})级联叠加式 UPS	390
6.7	简化电路与在线互动式 UPS	394
6.8	对工频 UPS 与高频 UPS 性能特点的评述	397
参考文献		406

第 1 章 绪 论

本章将介绍一些有关 UPS 电源的入门知识和一些通用的基础知识,如 UPS 的定义、作用、分类、组成、所用元器件、应用领域、技术指标,发展过程与发展方向、SPWM 与 PFC 技术、控制技术等。

1.1 UPS 的定义、作用与分类

由于市电电网供电和用电的复杂性,如市电电网容量的不足、输变电和各种配电设备的性能及质量问题、各种用电设备配置的不合理性、设备之间的相互影响、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,电网输出的交流电能并不是稳定的正弦波,而是使供电质量不断恶化,存在着各种供电质量问题,举例如下。

① 电压浪涌:指市电电网输出电压有效值大于额定值的 110%,持续时间为一个周波(20ms)至数个周波的电压变化。这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。

② 高压尖峰脉冲:指电压峰值达 6000V,持续时间为 1ms 至数个周波的电压尖峰。这主要是由雷击、电弧放电、静态放电、大型电气设备的开、关操作引起的。

③ 暂态过电压:指峰值电压高达 2000V,持续时间为 1~100 μ s 的脉冲电压。这主要仍是由雷击、尖端放电、大型设备的瞬时动作产生的。

④ 电压下陷:指电压有效值为额定值的 80% 至 85% 之间的低压状态,持续时间为一个周波至数个周波。这主要是由大型设备、大型电动机的启动,或大型电力变压器的接入造成的。

⑤ 线路噪声:指线路上的射频干扰(RFI)和电磁干扰(EMI)及其他各种高频干扰。大型电动机的运行、大型断路器的动作、广播发射、微波辐射等,均会产生线路噪声干扰。

⑥ 频率偏移:指电网频率的变化超过 ± 3 Hz 以上。这主要是由应急柴油发电机、水力发电机等的不稳定运行引起的。

⑦ 持续低电压:指电网电压有效值长期低于额定值。这主要是由大型设备的运行、主要电力的切换、线路过载等引起的。

⑧ 市电中断:指电网供电中断,其持续时间大于两个周波至数小时。这主要是由电网的断路器跳闸,市电供电中断或电网故障造成的。

根据一项调查表明:计算机采用具有上述质量问题的市电电源供电时,平均每个月都会遇到 120 次左右的供电问题。这些问题对于计算机的工作会产生很大的影响,如下所示。

① 计算机的内存对电源的要求很高,它是一种依赖电能的存储设备,需要不断地通过刷新动作来保持存储内容,一旦断电,其所保存的内容将立即消失。如果非正常断电,将会导致内存中的信息来不及保存到硬盘等存储设备上,就会造成信息完全丢失或变得不完整而失去价值,从而造成人力和时间上的浪费,重者甚至会造成巨大的经济损失。

② 对于操作系统而言,如果不是正常关机,则内存中的系统信息没有写回到硬盘上,还可能产生操作系统崩溃、无法再次启动的故障。

③ 计算机中的硬盘虽然应用的是磁存储介质,不会因断电而失去信息,但突然的电力故障会使正在进行读/写工作的硬盘物理磁头损坏,或者在维护文件系统时,造成文件分配表错误,从而会造成整个硬盘的报废。

④ 现在的操作系统大都能设置虚拟内存,由于突然断电,会使系统来不及取消虚拟内存中的内容,从而造成硬盘中的“信息碎片”,这样不仅浪费了硬盘的存储空间,还会导致计算机运行缓慢。

⑤ 计算机的电源是一种开关电源,过高的市电电压可能造成电源整流器烧毁,而且市电电压的尖脉冲和暂态过电压及电源杂波等干扰都可能通过整流器进入到主机板,影响计算机的正常工作,甚至烧毁主机线路。



总之, 供电问题对于计算机的工作具有很大的影响, 因此随着计算机网络应用的日益重要和广泛, 安全可靠的电源已成为计算机网络设计和管理人员不得不认真面对的重要问题。

由上可知, 直接用市电电网上的电能供电, 是不能满足计算机安全可靠工作要求的, 因此必须采用 UPS 电源供电。

所谓 UPS (Uninterruptible Power Supply) 电源, 即不间断电源, 是内部有蓄电池储能, 并以整流器和逆变器为主要部分组合而成的, 用于把市电电能变成计算机稳定工作需要的不间断、高质量交流电能的一种恒压、恒频静止式电力电子电源设备。同时, 这种电源设备还具有保护和监测监控功能。它主要用于向计算机及其网络系统提供不间断、高质量的交流电能。当市电输入正常时, UPS 将市电通过整流器和逆变器变换成高质量交流电能向计算机供电, 或直接稳压后供给计算机使用, 此时 UPS 就相当于一台交流稳压器, 除了向计算机供电外还向机内的蓄电池充电; 当市电故障中断时, UPS 立即将蓄电池的直流电能通过逆变器变换成高质量的交流电能, 向计算机继续供电, 以保护计算的软件和硬件不受损坏, 继续稳定地正常工作。

UPS 电源不但可直接应用于计算机, 而且在配有计算机的设备 (如医学上的 CT, 供应站的仪表等)、雷达站、军事、通信系统、程控电话系统、外科手术室等方面, 均可以用 UPS 代替柴油发电机组作为后备电源。

随着功率电子器件、计算机、自动控制、电化学、机电一体化、通信及网络等技术的发展, UPS 产品不断地升级换代, 现在已经实现了电路结构的模块化、集成化、全数字控制、环境集中监控及远程智能化管理等。基于此, 如今凡是应用到计算机的地方, 都要用 UPS 作为它的供电电源。当前 UPS 主要应用于计算机及其网络、通信、金融、电力、交通、国防、高校与科研机构、医院、公安等部门的供电, 起着至关重要的作用。

常用的 UPS 有五种, 即

- (1) 后备式 UPS;
- (2) 在线互动式 UPS;
- (3) 双变换在线式 UPS;
- (4) 双变换电压补偿在线式 UPS;
- (5) 三端口式 UPS。

相应的电路框图如图 1-1 所示。

各种 UPS 的特点分述如下。

① 后备式 UPS: 其电路如图 1-1 (a) 所示。它是静止式 UPS 的最初电路形式。其特点是技术成熟、电路简单、价格低廉, 应用广泛。当市电中断时, 其转换时间为 $4 \sim 10\text{ms}$ 。其输出转换开关受切换电流能力和动作时间的限制, 输出电压稳定度较差, 只适用于 $2\text{kV} \cdot \text{A}$ 小型 UPS 应用场合。

② 在线互动式 UPS: 其电路如图 1-1 (b) 所示。在线的含义指的是逆变器的工作处于在线状态, 但不输出功率, 处于热备用状态, 同时兼顾对蓄电池充电, 增大了市电正常时的功率容量, 减少了市电中断时的转换时间, 提高了输出电压的滤波作用, 属于并联式全功率调整方式。其输出电压稳定度较差, 电路简单、成本低, 适用于 $5\text{kV} \cdot \text{A}$ 左右的小容量 UPS 应用场合。

③ 双变换在线式 UPS: 其电路如图 1-1 (c) 所示, 特别适用于大功率 UPS 应用场合, 属于串联式全功率变换方式, 且市电供电与蓄电池供电的转换时间为 0, 输出的电能质量较高。当采用 SCR 相控整流器时, 市电输入功率因数只能达到 0.90 左右; 当采用 IGBT 高频 SPWM 整流器时, 市电输入功率因数可以提高到接近于 1。

④ 双变换电压补偿在线式 UPS: 其电路如图 1-1 (d) 所示。此项技术是 20 世纪 90 年代初提出来的, 主要是把交流稳压技术中的电压补偿原理和电力有源滤波器中的无功功率补偿技术应用到了 UPS 主电路中, 从而构成了串-并联补偿式 UPS (Delta 变换器式 UPS)。这种 UPS 的转换时间为 0, 输出电能的质量高, 适用于大功率 UPS 应用场合。

⑤ 三端口式 UPS: 其电路如图 1-1 (e) 所示。在线式 UPS 要经过直流变交流和交流变直流两次电能变换, 因此其整机效率低, 可靠性下降。三端口式 UPS 则力求通过改变 UPS 的结构来提高效率和可靠性。其基本工作原理是: 当市电正常时, 市电经交流稳压器送到三绕组变压器的绕组 I, 经变压器次级绕组 III 和转换开关向负载供电。与此同时, 市电经稳压器与绕组 II 向双向变换器供电, 双向变换器此时工作在整流状态, 将市电整流成直流电后对蓄电池充电; 当市电异常时, 控制电路立即切换到由蓄电池将直流电经过双向变换器逆变成交流电后继续向负载供电, 保证了负载供电的不间断。这种 UPS 的特点是整机效率高、可靠性高, 缺点是体积大、质量大、噪声大、价格偏高。

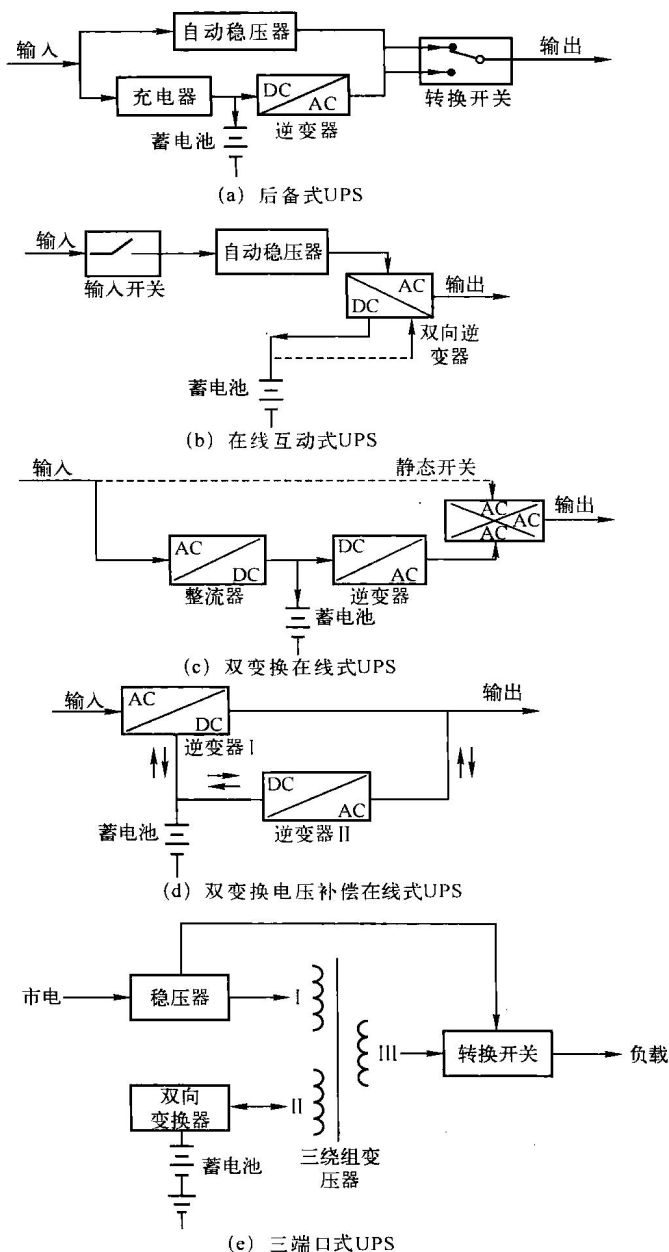


图 1-1 五种 UPS 电路的电路框图

在上述五种 UPS 中,适用于三相大功率应用场合的,如双变换在线式 UPS,是本书将要介绍的重点对象。

1.2 UPS 的组成与工作原理

以双变换在线式 UPS 为例,根据 UPS 的定义知 UPS 的作用有两个:一是当市电故障时仍然可以向负载提供不间断的电能;二是把含有电压浪涌、高压尖峰脉冲、暂态过电压、电压下陷、线路噪声、频率偏移、持续低电压和供电中断的劣质市电电源,变换成恒压、恒频、无噪声干扰、没有供电中断的优质电能。为此,UPS 电源电路的组成应包括以下几个部分,如图 1-2 (a) 所示。

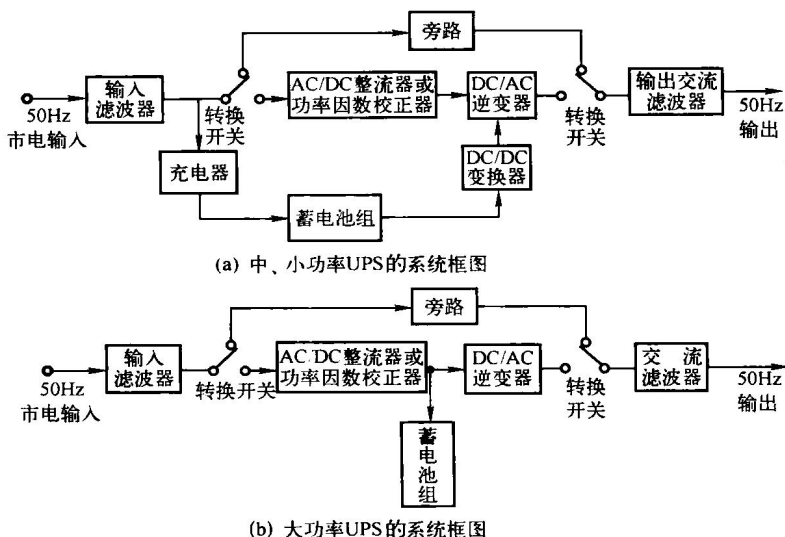


图 1-2 双变换在线式 UPS 的系统框图

- ① 输入滤波器：用于滤掉市电电源中的射频干扰（RFI）、电磁干扰（EMI）及其他各种高频干扰。
- ② AC/DC 整流器或功率因数校正器：用于将市电输入的劣质交流电能转换成直流电能，以便于将其逆变成恒压、恒频的优质电能，并向储能蓄电池进行充电。
- ③ DC/AC 逆变器：用于将 AC/DC 整流器输出的直流电能和市电停电时蓄电池中存储的直流电能，转换成恒压、恒频的优质电能，向负载不间断地供电。
- ④ 输出交流滤波器：用于滤除逆变器得到的输出电压中的谐波，提高 UPS 输出电压的正弦化质量。
- ⑤ 充电器：将市电电能经过整流后对蓄电池充电，用于延长当市电停电时向负载供电的时间。
- ⑥ DC/DC 变换器：用于将蓄电池的直流电压变换成逆变器所需的 350 ~ 400V 直流电压，以满足逆变器输出 230V 交流电压的需要。
- ⑦ 旁路：当 UPS 过载或逆变器故障时，用于立即切换到市电供电，以保证不间断地向负载提供电能。
- ⑧ 输入转换开关：用于市电故障时，将负载转换到由蓄电池经过逆变器供电，防止 UPS 的电能反灌到市电电源中去。
- ⑨ 输出转换开关：用于旁路与 UPS 供电之间的切换。
- ⑩ 蓄电池：UPS 中的储能器件。当市电正常时，由市电经过整流向蓄电池充电，使蓄电池储能；当市电故障时，将负载转换到由蓄电池经过逆变器的逆变作用向负载供电。它是 UPS 实现不间断供电功能的关键组成部分。

现在的大功率 UPS 的组成已经发生了变化，省掉了图 1-2（a）中的充电器和 DC/DC 变换器，并将蓄电池的电压升高到 400V 后直接接在整流器与逆变器之间，使 UPS 电路及其组成得到了明显的简化，也使 UPS 的可靠性提高了，如图 1-2（b）所示。

下面介绍 UPS 不间断电源的工作原理。

UPS 实现不间断供电的关键是储能蓄电池的引入。当市电正常时，由市电通过整流器把劣质的市电交流电能整流成直流电能。此直流电能一方面通过后面的逆变器转换成恒压、恒频的优质交流电能向负载供电，另一方面也向蓄电池充电，使蓄电池储能；当市电故障或中断时，控制电路立即将市电供电转换到由蓄电池通过逆变器把直流电能转换成恒压、恒频的优质交流电能继续向负载供电，以保证使负载得到不间断的优质交流电能。

此外，UPS 实现输出恒压、恒频优质交流电能的关键是拥有输入整流器和输出逆变器：输入整流器通过整流，可以把市电电源中的电压浪涌、高压尖峰脉冲、暂态过电压、电压下陷、频率偏移、持续低电压等劣质因素消除掉；输出逆变器可以使 UPS 的输出电压实现恒压、恒频，且输出电压中的谐波成分可以被输出交流滤波器滤掉，从而使 UPS 的交流输出电能成为优质的交流电能。

适用于 UPS 应用场合的整流器有两种：一种是采用输入变压器升压的 SCR 多相相控整流器，它可以使市

电的输入功率因数达到0.90;另一种是靠自身升压的IGBT Boost开关整流器,它可以把市电的输入功率因数提高到0.99以上。

适用于UPS应用场合的逆变器也有两种:一种是SPWM逆变器,它可以把输出电压波形的畸变率降到10%以下;另一种是SPWM级联叠加式逆变器,它可以把输出电压波形的畸变降低到5%以下。

此外,大、中型UPS与中、小型UPS是不一样的,大、中型UPS具有如下特点。

①大、中型UPS一般都是三相输入。对于大功率UPS,如果采用单相输入,就会导致市电电源负载的三相不平衡。一般来说,当UPS容量小于 $10\text{kV}\cdot\text{A}$ 时采用单相输入;当UPS容量大于 $10\text{kV}\cdot\text{A}$ 时采用三相输入。

②大、中型UPS一般都是三相输出。当负载是单台、单相设备时,要求UPS为单相输出;当负载是多台设备时,则要求UPS是三相输出。

对于三相输出的UPS,必须要考虑三相负载的平衡。一般性能较好的UPS基本上都具备三相负载100%不平衡的功能,可以允许某一相负载为零,另一相负载为100%长期稳定地工作。

③大、中型UPS目前还在采用可控桥式整流方式。这是因为大、中型UPS的整流滤波电容较大,整流器启动时的瞬态冲击电流很大,故可以采用可控整流方式实现软启动,使整流电压的建立成为一个相对缓和的过程,避免使启动冲击电流过大。

此外,整流电压稳定,可以提高UPS的输入动态特性,可以将整流器直接用于充电,且充电方式可以从原来简单的恒压、限流方式改成程控方式或可监控方式,从而省去了充电电路,如图1-2(b)所示。

利用可控整流器可以在市电缺相、错相、电压或频率严重超标、直流母线过载或短路等多种情况下实现保护;可以对整流/充电电流进行限流处理;可以对超过输入范围的市电电压停止进行整流处理。

还可以配置12脉波整流器,这样做一则可以减少输出直流母线上的直流脉动;二则可以减少对市电电源的谐波干扰。

④静态旁路开关。因为在逆变与旁路的转换过程中存在环流,所以对大、中型UPS来说,其转换的条件要求要高些。

静态开关的输入范围与整流输入市电的范围应分开要求(一般来说,静态开关的输入范围更小)。

如果市电超过静态开关的输入范围,则静态开关不允许从旁路转换到逆变。因此,当市电超出静态开关输入范围而尚未超过整流输入市电范围时,应该先用直流启动方式开启逆变器,然后再合上整流输入开关,由市电提供电能。

⑤开关设置。对于大、中型UPS而言,应设定相应的保护开关,这样一方面可以将各部分区分开,另一方面也可以建立明确的操作步骤。

a. 整流输入开关可以用来控制整流器输入的通/断。

b. 静态旁路开关可以用来控制静态旁路输入的通/断。

c. 电池开关可以用来减小UPS蓄电池的自放电,以控制UPS蓄电池组的通/断。

d. 逆变开关与小型UPS一样,用于启动或关闭逆变器。

e. 手动旁路开关:对于大、中型UPS而言,由于输入、输出电流较大、导线粗、固定方式严格,在维修时可能要停机或变更导线,所以一般都应该设置手动旁路开关。

当逆变器出现故障(或关闭),而UPS处于旁路状态时,先将手动旁路开关合上,然后分别断开输出开关、整流输入开关和静态旁路开关,这时,负载可以无间断地由市电通过手动旁路直接供电,而UPS内部则与市电及负载完全隔离以便进行彻底维修。当维修完毕后,先合上静态旁路开关及输出开关,再断开手动旁路开关,使负载无间断地从手动旁路转换到静态旁路,再合上整流输入开关,启动逆变器,恢复逆变器的输出供电。

⑥关机。由于大、中型UPS的负载相对比较重要,所以为了提高UPS供电系统的可靠性,常常会考虑采用并机方式运行,有时也会考虑采用并机方式扩大UPS供电系统的容量。

在各种并机方案中,应注意如下区别。

a. 无论是备份并机,还是真正的输出冗余并机,都可以提高系统的可靠性。

b. 扩容系统如果不是冗余使用,则双机之中只要有一台发生故障,系统就不能满足要求,因此其可靠性系统应该是串联系统。

c. 虽然系统采用备份并机与真正输出冗余并机两种方式的输出可靠性相同,但这是以单台UPS可靠性不变为前提的。实际上,当采用输出冗余并联方式时,往往会形成两台UPS相互并联的情况,从而会影响单台



UPS 的自身可靠性。

d. 有些并机会采用共用蓄电池线的方式, 这有利于对蓄电池的充分利用, 但是电池的共用必然会形成两台 UPS 相互之间的关联, 从而影响可靠性。

⑦ 配电要求。对于大、中型 UPS 的安装, 机房配电应符合容量要求, 且应按容量选择导线线径, 并根据负载对零、地线间电压的要求对配电做出相应的零、地电压要求; 对于三相输入的 UPS, 必须要求输入的三相电线按顺序排列。

1.3 UPS 的应用场合、负载性质及电流峰值系数

随着计算机事业、通信事业及各种办公设备、精密电子仪器的飞速发展与广泛应用, 对 UPS 的需求量越来越大, 要求也越来越高。同时, 随着我国的对外开放及对 UPS 要求量的增加, 国外各种品牌的 UPS 纷纷进入中国市场, 如美国的 APC、GE、Emerson, 法国的梅兰日兰, 日本的三菱, 德国的西门子, 意大利的 Seil, 丹麦的 Silcon, 英国的 ABB、Chloride, 瑞士的 IMV, 西班牙的 Salicru, 以及进入中国较早的山特、创力、山顿。国产 UPS 也在蒸蒸日上, 产品有台达、志成冠军、东方 (EAST)、科士达、信宝、实达、凌日、创维、科华、恒电等。

随着制造工艺的不断提高, 控制技术的日益完善, 功率器件的不断发展, UPS 已经从初期的一种备用电源发展成为一种具备稳压、稳频、抗电磁和射频干扰、抗电压浪涌等功能的电力保护系统。UPS 的效率、噪声、体积、动态响应速度和稳压精度等技术指标都有了很大提高。大、中型 UPS 的整机效率已达 93% 以上。平均无故障时间 MTBF 已达到 10 万小时以上, 过载能力和带非线性负载能力也都有了很大提高。

UPS 对计算机及其网络、通信、金融、医疗、电力、交通、国防及高等院校, 科研院所等部门的供电起着关键作用。UPS 的负载主要是小型计算机、服务器及其外围设备, 以及精密电子设备如 CT 等, 这些用电设备的输入电源大多数是单相高频开关电源, 电源的输入端一般都是没有功率因数校正的单相电容滤波式整流器 (如图 1-3 所示), 而这些整流器对于 UPS 来说就是一种感性非线性负载。

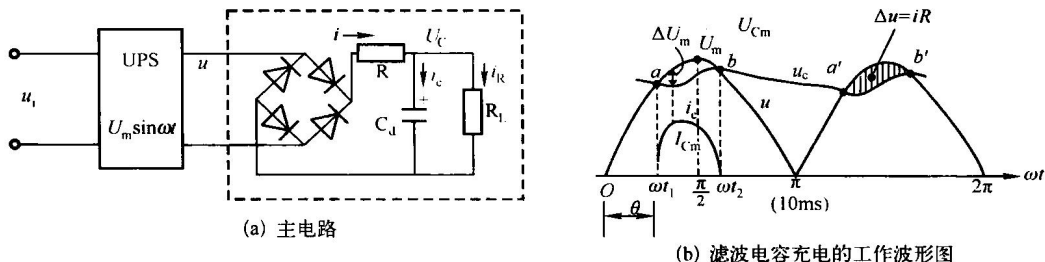


图 1-3 单相电容滤波式整流器电路

对于图 1-3 (a) 所示的单相电容滤波式整流器的主电路, 由于后面是容量较大的滤波电容, 所以容易使人产生一种误解, 认为这种负载的性质是容性的, 是电流超前于电压的。其实并不完全如此。因为在整流的情况下, 只有当正弦波电压的瞬时值高于电容上的电压时, 滤波电容才能开始充电, 形成充电电流 i_c 。

充电电压 U_c 的表示式为

$$U_c = U_m \sin(\theta + \omega t) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-1)$$

式中, U_c 为滤波电容上的充电电压; U_m 为输入正弦波电压的峰值; θ 为整流二极管开始导通的相位角, 根据情况不同, θ 的值也不同; τ 为电容充电时间常数, $\tau = CR$, 其中 C 为滤波电容 C_d 的容值, R 为充电回路的等效电阻的阻值; t 为所要求的充电时间。

如图 1-3 (b) 所示为稳态情况下滤波电容充电的工作波形图。充电从 a 点开始, 此时的相位角为 θ 。

由图 1-3 (b) 所示的工作波形可以看出, 充电电流 i_c 上升的大小取决于电压差 $\Delta U = U - U_c$ 和充电电路的等效电阻值 R , R 是不变常数值, 因此充电电流 i_c 的最大值 I_{cm} 完全取决于 ΔU 。

$$\Delta U = U - U_c = U_m \sin(\theta + \omega t) - U_m \sin(\theta + \omega t) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-2)$$

由式 (1-2) 可知充电电流 i_c 的最大值 I_{cm} 出现的时刻是 t 的函数 (此时 $\Delta U = \Delta U_m$, 当电容 C_d 的阻抗比负载 R_L 的值小时, i_c 上升得较快)。

式 (1-2) 表明, 出现电流峰值的时间也是二极管开始导通的相位角 θ 的函数, 电流峰值出现的时刻 t 与 θ 的关系如表 1-1 所示, 其函数关系为

$$t = \frac{T}{2\pi} \left(\frac{\pi}{4} + \theta \right) = \frac{10}{\pi} \left(\frac{\pi}{4} + \theta \right) \quad (1-3)$$

表 1-1 t 与 θ 的关系

初相位角 θ ($^\circ$)	30°	45°	50°	60°	70°	80°	85°	88°
初相位角 θ (rad)	$\pi/6$	$\pi/4$	$5\pi/18$	$\pi/3$	$7\pi/18$	$4\pi/9$	$17\pi/36$	$22\pi/45$
充电电流峰值出现的时刻 t (ms)	4.17	5.0	5.28	5.83	6.38	6.94	7.22	7.39
电流脉冲宽度 τ (ms)	3~4	3~4	3~4	3~4	3~4	3~4	3~4	3~4

由表 1-1 可以看出, 在 $\theta = \frac{\pi}{4}$ 之前, 充电电流峰值超前电压 u 的峰值, 是电容性的; 在 $\theta = \frac{\pi}{4}$ 时是电阻性的; 在 $\theta = \frac{\pi}{4}$ 之后就变成滞后的了。而几乎所有的电容滤波整流电路的电流峰值出现的相位角都满足 $\theta > \frac{\pi}{4}$, 甚至在 $\frac{\pi}{3}$ 之后。因此, 一般来说, 整流滤波负载是滞后的。

由表 1-1 也可以看出, 充电电流脉冲的宽度都在 3~4ms 之间, 其计算式为

$$\tau^* = t - t_0 + t_D \quad (1-4)$$

式中, τ^* 为充电电流脉冲的大约宽度; t 为电流脉冲峰值出现的时刻; t_0 为脉冲起始时刻; t_D 为电流脉冲的后沿宽度。

从以上的说明证明 UPS 的负载是滞后的非线性负载, 而且电流脉冲的宽度越小, 功率因数也越小; 电流脉冲的位移角越大, 功率因数也越小。

下面介绍 UPS 的一项重要性能参数, 即电流峰值系数。前面已经介绍过, UPS 电源的主要负载是小型计算机、服务器及其外围设备, 这些用电设备的输入端一般都是没有功率因数校正功能的单相电容滤波式全波整流器 (如图 1-3 所示), 这种整流器 (前面已经证明) 就是 UPS 的具有滞后性能 (感性) 的非线性负载。为了衡量 UPS 带动非线性负载的能力, 提出了电流峰值系数的概念。所谓电流峰值系数, 就是用来衡量 UPS 对非线性负载的驱动能力的一个参数。典型的 UPS 的非线性负载电路如图 1-4 所示。图中的 C_d 为容量为 C 的直流滤波电容, R_L 为用电设备的等效直流输入电阻。当输入电压为正弦波时, 其输入电流波形如图 1-5 所示。设 I_p 为周期性非正弦波电流的峰值, I_a 为非正弦波电流的有效值, 则电流峰值系数为

$$K = \frac{I_p}{I_a}$$

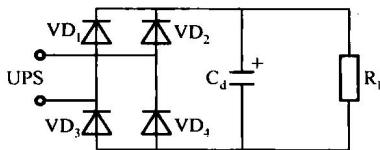


图 1-4 UPS 的非线性负载电路

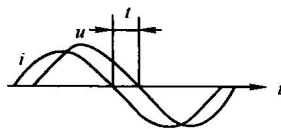


图 1-5 容性负载时输入端的电压、电流波形

由试验表明, 当失真功率因数 $PF_D = 0.7$ 时, $K = 3 \sim 3.5$ 。如果 UPS 峰值电流输出能力较强, 则随着负载失真功率因数的降低, K 值可以达到 5 左右, 但此时负载的失真功率因数 $PF_D \approx 0.5$ 。当滤波电容 C_d 的容值和逆变器等效输入电阻 R_L 的阻值相乘, 满足 $R_L C_d \approx 0.15s$ 时, 一个没有功率因数校正的单相输入 UPS 的输入失真功率因数为 0.7 左右。但当负载电流变化时, 输入失真功率因数也会随着变化, 因此一般要求 UPS 输入电流峰值系数 $K \geq 3$ 。

UPS 的输出电流峰值系数是由逆变器功率电路和输出电路的设计决定的, 但设计者和产品检验机构必须具有相应的试验方法来验证设计是否符合相关标准。



1.4 UPS 的性能指标

衡量 UPS 性能好坏的指标有两部分：一部分是对市电电网和负载的适应能力；另一部分是 UPS 的技术性能。这些性能包括：

- 输入指标
 - ① 容量
 - ② 输入电压、电流和频率的范围、相数
 - ③ 输入功率因数、输入电流谐波
- 输出指标
 - ① 输出电压、输出频率、输出电压稳定度
 - ② 波形失真度
 - ③ 负载功率因数
 - ④ 电流峰值系数
 - ⑤ 动态电压瞬变范围
 - ⑥ 瞬变响应时间
 - ⑦ 负载不平衡度
 - ⑧ 总效率
 - ⑨ 过载能力
 - ⑩ 旁路开关切换时间

上述技术指标在国家标准 GB/T 14715—93 中都有明确的规定。

① 容量：UPS 的首要指标，可以分为输入容量和输出容量。一般指标中给出的容量都是指输出容量，也就是输出电压与输出电流额定值的乘积。容量的单位一般用伏安（V·A）表示，这是因为 UPS 的负载性质因设备的不同而不同，所以只好用视在功率来表示。这里需要注意的一点是，为了使 UPS 工作更可靠，最好不要将容量用满，要留有一定的裕量。

② 输入电压范围：输入电压可说明 UPS 适应什么样的供电制式，并应标明输入交流电压是单相还是三相，输入电压的数值是 220V、110V 还是 380V 等。输入电压范围是指 UPS 对市电电压变化的适应范围是多少，如标明 $\pm 15\%$ 就表明在额定电压基础上有 $+15\% \sim -15\%$ 的变化范围。

③ 输入频率：用于标明 UPS 所适应的输入交流电源的频率及允许的变化范围，如 $50\text{Hz} \pm 2.5\text{Hz}$ 。

④ 输入电流：指 UPS 在保证额定输出功率和蓄电池充电功率时，输入交流相电流（单相）或线电流（三相）的有效值，即额定输入电流。用输入电流给出的数值，可以很方便地计算出交流输入配电路径和设备容量。

⑤ 输出电压：如 220V、380V 等，有的还同时给出输出的相数。用户可以根据自己的设备所需的电压等级和供电制式选择 UPS。

⑥ 输出频率：我国的市电电网频率为 50Hz，用户在选择 UPS 时一定要注意它的输出频率与市电电网频率兼容。在线 UPS 处于同步锁定状态，其输出频率漂移可达 $\pm 2\text{Hz}$ ；而当市电发生故障，转为内振决定输出频率时，一般漂移为 $\pm (0.5 \sim 1)\text{Hz}$ 。

⑦ 输出电压波形：在选购 UPS 时，可以根据自己的用途选用 UPS，不一定非选正弦波输出的产品，如计算机的主机对方波、梯形波与正弦波都能适应，但方波 UPS 电路简单、价格低廉。在标明输出电压波形时，一般还要指明总谐波失真的范围，如注明 $\text{THDi} < 3\%$ ，即说明总谐波失真小于 3%。

⑧ 功率因数：对于非线性电路而言，尽管输入电压为正弦波，但电流却可能是非正弦波，因此对非线性电路必须考虑电流的畸变。

一般定义

$$\text{PF} = \frac{P}{S}$$

式中，PF（Power Factor）为功率因数； P 为有功功率； S 为视在功率。

在非线性电路中，定义基波电流有效值与非正弦电流有效值之比为畸变因数，即电流畸变因数 K_d （distortion）为

$$K_d = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_{n-1}^2 + I_n^2}}$$