

大功率 UPS 的工作原理及应用

宋健¹, 朱鹏², 张文雅¹, 雷宇¹

(1. 中国电子科技集团公司 第十三研究所, 河北 石家庄 050051; 2. 清华同方, 北京 100084)

摘要: 论述了各种因市电供电故障原因给半导体设备带来的危害, 说明为了保证半导体生产线某些重要设备长期安全运行采用大功率 UPS 提供高质量供电的必要性。由于近代电力电子技术的不断发展, 新的调制理论和器件的应用, 使得 UPS 性能得到极大的提高, 其输出功率现在可达到 1 000 kV·A 以上, 输出近乎完美的正弦波电压波形, 满足了各种负载需求。并论述了近代发展起来的 UPS 核心技术 SPWM 的原理和基于 SPWM 技术设计的三进三出逆变器以及 4 种类型的 UPS 的工作原理及重要技术参数。

关键词: UPS; SPWM; IGBT

中图分类号: TM761^{+.1}

文献标识码: B

文章编号: 1004-4507(2007)06-0049-05

The Principle and Application of High-power UPS

SONG Jian¹, ZHU Peng², ZHANG Wen-ya¹, LEI Yu¹

(1. The 13th Research Institute, CECT, Shijiazhuang 050051, China; 2. Qinghua Tongfang, Beijing 100084, China)

Abstracts : This article expounds the reason caused by the power supply trouble in transmission-line system of electric power, and the damage brings to the equipment, shows the necessity of using high-power UPS to provide the high quality power supply, in order to ensure the long-term safe operations of some important equipment in semiconductor production line. The development of modern electric power technology and the new modulation theory and device application, enable the UPS performance to obtain extremely enhancement, its output now may achieve above 1000KVA, the output voltage approaches the perfect sine wave, which has met each kind of load. This paper also expounds the core technology SPWM principle of UPS which was developed the modern time, and three-input-three-output inverter based on the SPWM technical as well as the work principle of four kind of UPS and the UPS important technical parameter.

1 前言

在半导体工业中供电电网故障严重影响半导

体生产设备的正常运行, 有时甚至将设备损坏, 如由于供电电网在没有预先通知下突发的掉电故障就极有可能损坏设备。现代半导体工业中动辄价值

收稿日期: 2007-05-28

作者简介: 宋健(1951-), 男, 高级工程师, 从事半导体设备设计与维护工作;

上百万甚至上亿人民币的设备已不少见,如投影光刻机,电子束扫描光刻机,MBE 等设备,这些极其精密昂贵的设备对电网质量的要求是苛刻的,假设产生上述电网故障,正在运行的这些设备在没有 UPS 保护下顺序关机将有可能产生:电子枪系统损坏,运动机械卡住或碰撞,高真空系统被破坏等严重事故。据有关资料报道日本在 1971 到 1981 年供电电网输电事故统计高达 24876 件之多,这是由于供电电网从电站到用户终端要经过分压开关、高压电网、变电站等许多环节,无论哪个环节出现问题都是供电电网故障,所以存在供电电网故障也是很自然的。由此可见电网供电故障必须引起我们的高度重视。供电电网故障主要表现为:(1)电网电压在没有预先通知的情况下中断;(2)电网电压瞬时中断后短时间内又恢复:这种故障瞬间出现,有时仅有十几毫秒,很难让人察觉但对没有 UPS 保护的设备产生了破坏,因为半导体设备控制计算机所允许的瞬时供电中断时间在 8~10 ms 之间,超过这个范围控制计算机将进入自检误动作状态,从而造成正在运行的数据或者程序可能被丢失或破坏,据统计,电网瞬时中断大于 50 ms 故障占此类故障的 60%以上,这种故障只能用带历史记录测试仪器监测得到,属于隐性电网供电故障;(3)电网电压低于正常值下限:此故障是由于重载启动运行,开动大型电机,过载电路动作造成。此类电网故障可引起控制电路直流电源降低,控制电路工作点偏移等等;(4)电网电压高于正常值上限:这种故障会引起电机过热,开关电源功率管超载损坏等故障,这种故障往往是由于大型重载设备关闭产生;(5)电网电压尖峰扰动:这是由于闪电、大功率的断路器瞬间开关、弧光放电所致,有时会产生电网电压瞬间峰值大于 6 kV,持续时间 10~100 ms 的扰动。电网电压尖峰扰动故障带来的后果是严重的,所以用户终端一定要采用三级防雷措施,采用 TVSS (Transion voltage surge suppressor 高压浪涌抑制器)进行有效地双向抑制尖峰扰动;(6)电网电压的谐波干扰:这是由于大功率的射频源或是重载设备的非线性对电网的回馈造成,分为共模和差模谐波干扰,它们对终端设备信号的提取和传输产生影响。

综上所述,为了避免电网故障对设备的影响,UPS 自然成为了人们的选择。近代由于大功率器件 IGBT 的诞生和电力电子开关调制理论进步产生新一代的大功率 UPS,其主要特点是:输出功率大:几十 kV·A 到 1 MV·A 视在功率;频率稳定度高:50±0.1 Hz(在线式 UPS),波形失真小:失真度<2%;掉电维持时间,由用户指定。大功率 UPS 的应用可使精密昂贵的半导体设备工作在一个稳定、可靠、干净的供电电网环境中。

2 大功率 UPS 工作原理

大功率 UPS 大都采用“SPWM 正弦波调制+逆变器”^[1]工作模式。为了得到近似的正弦波的脉宽调制波形,在正弦波一个周期内可划分 N 个时间等分,每个时间等分代表一个脉宽 $2\pi/N$,这样每个正弦波脉宽面积为:

$$\int_{\frac{2\pi(i-1)}{N}}^{\frac{2\pi i}{N}} u_m \sin\theta d\theta = 2u_m \sin\left(\frac{2\pi i}{N} - \frac{\pi}{N}\right) \sin\frac{\pi}{N},$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, N)$$

每个时间段上都可采用一个面积与之相等的等幅而不等脉宽的矩形波代替,设矩形波幅度为 V_m ,则各矩形波脉宽:

$$W_i = \frac{S_i}{V_m} = \frac{2}{V_m} u_m \sin\left(\frac{2\pi i}{N} - \frac{\pi}{N}\right) \sin\frac{\pi}{N}$$

实际应用中采用基准正弦波为调制波,等腰三角形波为载波通过比较器产生等幅不等脉宽的矩形波序列,如图 1 所示。

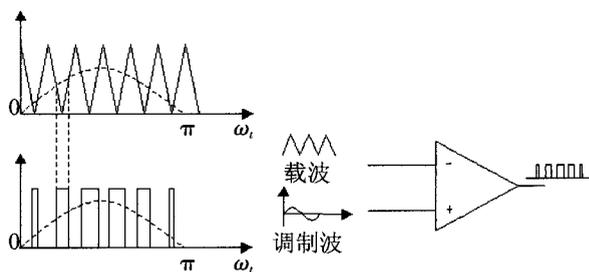


图 1 正弦脉宽调制

当载波条件恒定,改变调制波的频率 f_i 即可改

变输出脉冲的频率,改变调制波的幅度即可改变输出脉冲的脉宽,即改变了基波的大小进而改变逆变器输出大小,这就是 SPWM 正弦脉宽调制设计思想。设载波频率为 f_c , 则载波比 $N = f_c / f_r$, N 应为偶数值是为了满足输出矩形波序列奇函数。增大载波比 N 可减少 3, 5, 7 等低次谐波能量, 通过改变输出矩形波序列的开关角可消去对系统有害低次谐波分量。实际应用中当 $N \geq 160$ 最低次谐波频率也在十几千赫以上, 这样逆变器输出差模滤波器 LC 值大为减小, 瞬态特性显著提高。图 2 为三进三出逆变器工作原理图。正弦调制波 u_r 通过市电相位跟踪电路严格与市电锁相同步, 目的是为了在执行市电交流旁路与逆变电源供电相互切换时安全可靠。等腰三角形载波 u_c 与 u_r 求差后在 AA' 端产生相位相反的 SPWM 信号驱动上下桥臂 IGBT 大功

率管 IG_1, IG_2 , 通过差模滤波器消去高次谐波即在 A 相负载产生正弦波电压, 负载端取样负反馈信号用于稳幅稳频的目的。为了防止上下桥臂同时导通而产生严重事故, 死区控制电路在调制波交越处生成一个 Δt 的低电平同时截止 IG_1, IG_2 , $\Delta t > (IGBT \text{ 开启时间参数} + \text{关断时间参数})$ 。由于输出最低次谐波频率达十几赫以上, 差模滤波器取值很小即可在输出端得到失真度很小纯正弦电压。大功率 UPS 按工作原理分为在线式 (on line) UPS, 离线式 (off line) UPS, Delta 逆变型和飞轮储能型 UPS。在线式 UPS 工作时无论市电正常与否都是通过逆变器向负载提供纯净、稳定的正弦波电源, 一旦市电中断在线式 UPS 在零转换时间下工作于电池后备状态, 仅在 UPS 出现故障时由旁路开关切换到市电供电, 图 3 为在线 UPS 工作原理框图。

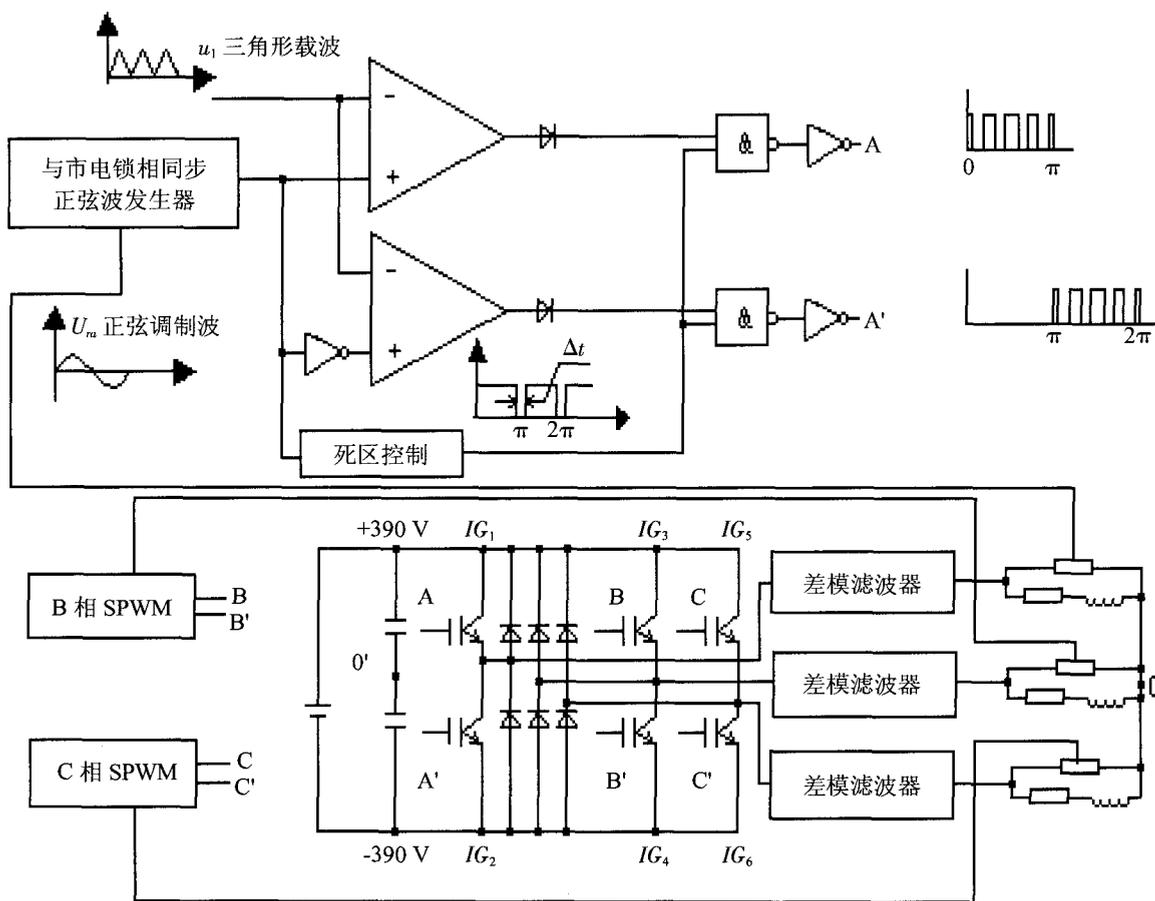


图 2 三进三出逆变器工作原理

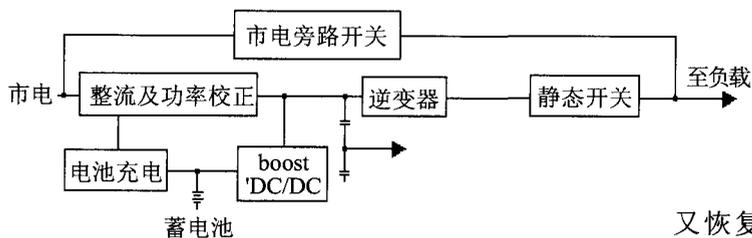


图3 在线 UPS 工作原理

其代表产品如：山特 3C₃ 系列, RACK 系列, 台达 NT 系列, 西门子等。离线式 UPS 在市电正常时由市电向负载供电, 当市电中断则在 8~10 ms 内切换至逆变器供电, 这时储备电池通过逆变器向负载放电。Delta 逆变型 UPS 工作原理框图如图 4 所示。

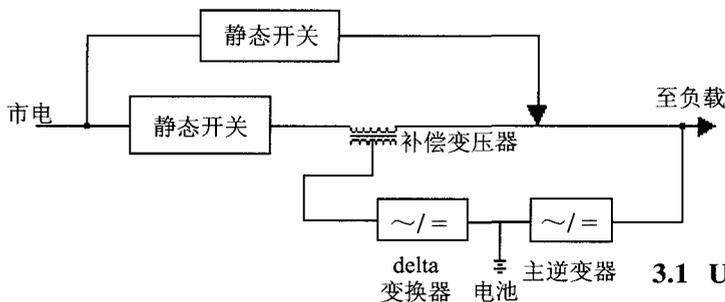


图4 Delta 逆变型 UPS 工作原理

其主要特点是采用了两个具有四相限控制特性的 Delta 逆变器和主逆变器, 在市电正常时 (380V±15%, 50±3 Hz) 主逆变器向电池充电, 并向 Delta 逆变器提供直流工作电源。通过负反馈回路由 Delta 逆变器, 补偿变压器产生于市电波动相位相反的补偿电压 ΔV 来抵消波动, 从而使负载得到 380 V±1% 的稳定工作电压, 这时 Delta 逆变型 UPS 相当于串联交流稳压器。当市电不正常时, 静态开关全部关断与市电联系, 由电池组, 主逆变器向负载提供 380 V±1% 的稳定工作电压。代表产品为美国 Silcon 公司 DP300E 系列 UPS。飞轮储能 UPS^[2]主要特点是采用置于真空环境中的大质量飞轮和可逆向工作的 DC 电机来储存能量, 在市电正常时四相限逆变器 AC/DC 工作 DC 电机带动飞轮

以 7 700 r/min 速率转动, 将能量以转动惯量形式储存在飞轮中。一旦市电瞬时中断, 飞轮驱动 DC 电机发电, 逆变器 DC/AC 工作向负载提供交流电源持续时间 < 15 s, 其主要用于克服市电瞬时中断又恢复的电网故障。代表产品为美国 Caterpillar UPS, 香港中华电力公司已将其应用于电网输电系统中。

综上所述, 比较各种类型 UPS, 应当属在线式 UPS 工作原理最为优越, 因为在线式 UPS 可以在全时段向负载提供精确本机振荡 50 Hz 频率, 稳定 380 V 交流电源, 其唯一不足是逆变器大功率 IGBT 将面临长期不间断工作的严峻考验。

3 大功率 UPS 的应用

UPS 质量好坏主要依据 UPS 的技术参数来判断, 所以正确理解 UPS 的技术参数是用户选择适合实际需要 UPS 的必要条件。

3.1 UPS 的额定输出功率和输出功率因数 P_f

UPS 额定输出功率是指 UPS 的额定输出视在功率, 单位为 kV·A。而输出功率因数 $P_f = I_1/I_x \cos\alpha$, 其中: $I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$, I_1 为 50 Hz 基波电流, P_f 输出有功功率与输出视在功率比值和各低次谐波含量有关。大功率 UPS 额定输出功率一般是在 $P_f = 0.8$, 负载为纯电阻条件下给定的, 这是考虑到 UPS 的负载一般为整流滤波型的微电容性负载, 厂家将 P_f 设计为微电感性滞后性功率因数, 已达到提高实际使用功率因数数值之目的。所以大功率 UPS 实际输出功率还和负载功率因数性质有关, 当负载为纯电阻性质, UPS 输出功率为 80% 的额定输出功率, 当负载为 0.8 容性功率因数, UPS 输出功率 100% 的额定输出功率, 当负载为电感性负载, 输出功率将低于额定输出功率的 80%。

3.2 输出电压的稳定度和瞬态特性

大功率 UPS 输出电压稳定度典型值为 ±1%。

瞬态特性是指当电压波动小于±5%时,UPS 输出电压应在 20~40 ms 内趋于稳定值。该参数反映了 UPS 调控品质。

3.3 输出频率稳定度

在线式大功率 UPS 输出频率稳定度使用内部振荡器工作时典型值:50 Hz±0.01%,与市电同步工作时典型值:50 Hz±1%。

3.4 输出电压的总谐波失真度

典型值:小于 2%(线性负载)。

3.5 大功率 UPS 额定输入电压、频率的范围

典型值:380 V±20%,输入频率:50 Hz±5%,UPS 所允许输入电源的波动范围越大,表明其对市电环境适应能力越强。

3.6 整机效率

整机效率是指 UPS 总输出功率 kV·A 与总输入功率的比值,在线式 UPS(10~50kV·A)效率为 92%左右。提高 UPS 的输入功率因数值是增加整机效率的重要方法之一,输入功率因数反映 UPS 对市电电源的利用效率和谐波分量的大小。为了提高输入功率因数厂家在市电输入端设计了谐波滤波器和 12-pulse 整流器电路模块使输入功率因数增加到 0.95 以上,谐波分量下降到 10%以下。从而使整机效率达到很高指标。由于成本因素有的厂家将上述模块作为选购项目,用户视具体情况配置。

3.7 大功率 UPS 抗过载输出能力

实践证明当 UPS 带容形式感性负载,启动 UPS 时,会产生瞬态浪涌电流,其值约为 200%的工作电流,持续时间约为 150 ms,所以 UPS 必须具有抗过载输出能力,否则将损坏 UPS。在线式 UPS 抗过载能力典型值为:125%,10 min,150%,30~60 s。抗过载维持时间大于瞬态浪涌电流的持续时间和过载跳闸响应时间,这时当瞬态浪涌电流消失后逆变器还正常工作,否则逆变器工作支持到空气开关过载跳闸,或切换到市电旁供电已达到保护 UPS 的目的。

用户应根据负载的容量及特性来配置大功率 UPS,一般选取 UPS 额定容量 40%~65%,UPS 绝对不可长期处于满载运行。另外对起动峰值电流大的负载,应按起动峰值功率配置 UPS,不应按负载稳态额定功率来选配。只要用户根据负载情况合理配置 UPS,即可长期安全运行,10~50 kV·A 大功率 UPS 的 MBTF 可长达 13~22 万 h。

在市电供电正常时,UPS 使用的蓄电池按浮充方式充电将电能转化为化学能。当市电供电中断蓄电池将储存的化学能转换为电能通过逆变器向负载供电。现在 UPS 广泛使用密封式免维护铅酸蓄电池作为储能电池,市场提供给用户 12 V 免维护密封铅酸电池品种有:24,33,38,50,65,75,90,100(Ah)等。表 1 为电池生产厂家提供的 12 V 蓄电池放电特性数据表。电池放电时间定义为:蓄电池以规定电流恒流放电,电池额定电压下降到终止电压所需的时间。放电速率定义为:蓄电池以规定放电电流放电释放出实际能量与额定能量之比。 C 代表电池放电速率, C = 电池实际放电电流(A)/电流标称容量。

表 1 蓄电池放电特性数据

放电电流	2C	1C	0.6C	0.4C	0.2C	0.1C	0.05C
放电时间	12 min	30 min	1 h	2 h	4 h	9 h	20 h
放电效率	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

UPS 配置蓄电池所用基本公式:

UPS 额定功率×UPS 输出功率因数 = (电池标称容量×电池放电效率)×蓄电池组电压×UPS 逆变器效率

注:等式左方为 UPS 输出有功功率,因负载功率因数不好确定,权且作为纯电阻负载计算。UPS 逆变器效率按 0.9 取值。

例:UPS 额定功率 3 kV·A,输出功率因数 0.7,UPS 蓄能蓄电池组电压 96 V,要求支持 1 h,求选用电池容量。

由表(1)查得在放电时间等于 1 h 时,器放电效率为 0.6,代入基本公式:

$$\text{电池标称容量} \times 0.6 \times 96 \times 0.9 = 3000 \times 0.7 \times 1$$

(下转第 58 页)

体端面的接触压强整体随之降低,而且峰值的位置未发生变化都在其边缘处。光纤端面的接触压强分布均匀并且随之降低。从图中可知,当抛光垫的杨氏弹性模量值增加到一定程度后,再改变其值对接触压强分布的影响非常微小。由于改变了抛光垫的杨氏弹性模量而造成抛光垫的变形程度不同,进而造成光纤连接器的接触表面接触压强分布的变化。

6 结束语

通过上面应用 ANSYS 仿真实验及对仿真结果的验证,说明 ANSYS 软件应用在光纤连接器的抛光仿真完全具有可行性,并能提供给我们比较准确的仿真结果,从而为光纤连接器端面抛光的优化分析提供了充分的理论依据。综上所述,在光纤连接器的端面抛光过程中,为了提高光纤连接器表面接触压强分布的均匀性,应尽量研究开发与光纤纤芯性能更为匹配的、耐用度高、成本低的抛光垫材料,

建议在一定范围内选用低泊松比和高杨氏弹性模量的材料作为抛光垫。

参考文献:

- [1] D.Wang,J.Lee,K.Holland,T.Bibby,S.Beavdoinand T.cole. Von Mises Stress in Chemical-Mechanical Polishing Process. J.Electrochem.Soc., 1997, 144(3).
- [2] 吕玉山.薄形零件超精密平面研磨和抛光的若干理论与实验研究[J].超精密研磨与抛光的机理,东北大学,沈阳中国,1997.12.
- [3] 马俊杰,潘国顺等.计算机硬磁盘 CMP 中抛光工艺参数对去除率的影响[J].润滑与密封,2004(1).
- [4] 刘相新,孟宪颐.ANSYS 基础与应用教程[M].北京:科学出版社,2006.
- [5] 博弈创作室.ANSYS 经典产品基础教程与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [6] T.Shintaku,et al.Highly Stable Physical-Contact Optical Fiber Connectors with Spherical Convex Ends. J.Lightwave Technol.1993,11(2):241-247

=====

(上接第 53 页)

电池标称容量 = 40.5 Ah

可选用标称电压为 12 V 免维护铅酸电池容量 38 Ah, 8 (96/12) 块即可。大功率 UPS 需要市电网采用三相五线制供电, 由于 UPS 负载大多是整流滤波型负载, 其产生的奇次低次谐波导致中线电流增大, 加上三相不平衡带来的中线电流, 所以强调指出 UPS 中线截面积应大于相线截面积 1.5 倍, 贯通至变电站, 以保证中线对地电压小于 0.6 V 以下, 这与传统中线截面积小于相线截面积的配电体制不同, 应引起用户注意。

4 结束语

由于大功率 UPS 本身就是一种复杂且价格不菲的设备, 人们不禁提出疑问: 使用 UPS 是否提高了半导体生产设备的成本? 实则不然, 因为当市电网发生故障时由于 UPS 的保护, 避免了昂贵的半导体生产设备由此可能产生的故障损害, 可能仅一次就收回了 UPS 成本, 何况长此以往, 使用大功

率 UPS 带来的潜在效益毋庸置疑。现今在一些极重要的领域为了使电网全天候无故障供电, 还采用具有容错功能的冗余配置的大功率 UPS, 当一台 UPS 出现故障, 计算机系统检测到后立即将其脱机, 其它 UPS 继续向负载供电。笔者认为大功率 UPS 在设计原理上还存在一些不足, 如: 在市电旁路和逆变器输出相互切换时, 虽然二者已在相位上锁相同步处理, 但却存在幅度差异, 这样在 UPS 中形成环流, 对功率 IGBT 管不利。这些问题有待于厂家进一步提高完善。相信随着电力电子技术的不断进步, 性能更为优异的大功率 UPS 将会出现以满足用户要求。

参考文献:

- [1] 贺益康,潘再平. 电力电子技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 王冉冉,刘玉庆. 飞轮储能装置的性能特点及其应用展望[J]. 电源技术应用,2004,6(4):176-179.