

不停电供电技术

—UPS

巫长年 编著



机械工业出版社

本书比较系统地介绍了最近十几年来迅速发展的静止不停电供电系统 (Uninterruptible Power System) - 简称UPS。第一章介绍不停电电源的一般问题, 提出供电的可靠性方案; 第二、三章着重讨论了不停电供电的理论基础——锁相原理及应用; 第四章介绍逆变器的原理、性能和分析方法; 第五章介绍静止开关; 第六章介绍采用“电源扰动分析仪”对UPS进行监测的技术; 第七章介绍不停电电源的最新发展。

本书可供从事电源技术的人员和大专院校有关专业的师生参考, 亦可供在电力电子学领域中工作的同志参考。

不停电供电技术

——UPS

巫长年 编著

责任编辑 贡克勤

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $13 \frac{1}{2}$ · 插页 1 · 字数 325 千字

1986年2月北京第一版·1986年2月北京第一次印刷

印数 00,001—20,000 · 定价 2.85 元

*

统一书号: 15033 · 6409

前 言

计算机应用的迅速发展,对高质量供电提出了严格的要求。有些部门,由于电源故障要付出很大的代价或带来危险,如过程控制系统、数据处理系统、航空站、能源中心、医用控制系统、交通控制系统等。为了解决供电质量(供电无任何瞬间中断,电压和频率稳定,抑制输电线路上的干扰等),近十几年来迅速发展了静止的不停电供电系统(Uninterruptible Power System),简称 UPS。

涉及电力、电子和控制理论的电力电子学的迅速进展,致使 UPS 的容量从几百 VA 发展到几 MVA,广泛应用于国民经济的各个部门。七十年代以来,我国相继引进了不少的 UPS 设备,并已初步建立了生产体系。广大工程技术人员做了大量的分析和研究工作,这些宝贵资料多散见在一些期刊和内部出版物上。在此基础上,作者结合自己的工作和体会,尝试整理出一本供从事电源技术的工程技术人员阅读的参考书。

本书着重讨论了不停电电源的理论基础——锁相原理的应用,以及不停电电源的核心部分——逆变器。整流器、蓄电池、静止开关等虽然也是不停电电源不可缺少的,但限于篇幅,书中只作一般地讨论。本书对新的测试仪器——“电源扰动分析仪”的结构和性能也作了较多地介绍。

本书可供从事电源技术的人员和大专院校有关专业的师生参考。

本书脱稿前,承王发庆教授仔细审阅,提出不少宝贵意见,作者谨向王发庆教授表示谢意。作者还要感谢国家计委计算中心李培楠同志和北京工业大学应用数学系蔡绍华同志的积极支持。

由于不停电电源涉及面广,加之作者水平有限,时间仓促,书中难免有错误之处,恳请读者批评指正。

巫长年
一九八五年二月

目 录

前言

第一章 不停电电源的一般问题 1

§ 1-1 引言 1

§ 1-2 系统框图 2

一、整流器 2

二、蓄电池、充电器 4

三、自动切换电路 7

四、逆变器 8

§ 1-3 可靠性 备用性 性能指标 10

一、有关可靠性的术语 10

二、不停电电源的可靠性和备用性 11

三、计算机供电中心不停电电源的考虑 12

四、性能 15

§ 1-4 不停电电源的选择 17

一、容量选择 17

二、决定负载电压、频率和相数 18

三、决定保护时间 19

第二章 锁相技术基础 21

§ 2-1 简单锁相环的传递函数 21

一、锁相环的组成 21

二、锁相环的传递函数 31

§ 2-2 锁相环的稳定性 32

一、锁相环的阶和型 32

二、根轨迹法 33

三、伯德图 38

四、锁相环的相对稳定性 40

§ 2-3 锁相环的跟踪性能 42

一、线性跟踪 42

二、非线性跟踪 47

§ 2-4 环路的捕获 50

一、差拍状态与频率牵引现象 50

二、辅助捕获 51

第三章 锁相技术应用 53

§ 3-1 具有最小纹波的锁相环设计 53

一、纹波所引起的相位偏差 53

二、设计实例 54

§ 3-2 锁相环电压调节系统 59

一、概述 59

二、环路分析 60

三、各环节的计算 61

四、状态方程列写并判断系统稳定性 68

五、用计算机求时域解 73

六、触发脉冲的安排 84

§ 3-3 逆变器控制电路 85

一、实现相位跟踪 86

二、实现输出电压的自动调节 90

第四章 逆变器 94

§ 4-1 逆变器换流电路 94

一、晶闸管换流方法 94

二、逆变器电路分析 100

§ 4-2 逆变器的选择 108

一、额定功率小于 10kVA 的逆变器 108

二、额定功率大于 10kVA 的单相

逆变器 113

三、额定功率小于 30kVA 的三相

逆变器 122

四、额定功率为 30 ~ 100kVA 的三相

逆变器 124

五、额定功率大于 100kVA 的逆变器 125

§ 4-3 不停电电源的滤波器 134

一、无源滤波器的基本电路 134

二、低通滤波器 138

第五章 静止开关 145

§ 5-1 静止开关 145

一、概述 145

二、原理 145

§ 5-2 检测与控制 151

一、电压检测 152

二、相位检测 154

三、控制逻辑 156

四、输出控制 160

第六章 监测技术 163

§ 6-1 电源扰动分析仪 163

一、概述 163

二、电源扰动分析仪	163	三、可关断晶闸管 (GTO)	184
§ 6-2 信号和保护	171	四、自关断型元件的发展	186
一、光电耦合器检测电路	171	§ 7-2 自关断型元件的应用	187
二、电流检测	173	一、应用的一般问题	187
三、快速熔断器	174	二、应用基础	191
§ 6-3 试验方法	175	§ 7-3 微型计算机的应用	199
一、稳态性能试验	175	一、提高性能	199
二、暂态性能试验	176	二、控制电路标准化	200
第七章 不停电电源的发展	180	三、提高可靠性	200
§ 7-1 自关断型元件的工作特性	180	四、价格低廉	200
一、双极型功率晶体管	181	主要符号表	203
二、功率MOS-FET	183	参考书目	205

第一章 不停电电源的一般问题

§ 1-1 引 言

随着信息处理技术的不断发展,对供电系统可靠性的要求越来越高。例如计算机、通讯系统、医用仪器、检测和保护电路等就是这种类型的负载,一旦发生供电中断,所造成的损失是巨大的。由于影响输电线路安全运行的因素很多,如雷击、鸟害、用户所引起的故障跳闸等,仅仅依靠市电供电的可靠性是不高的。

另外一个重要的问题是市电供电的质量常常不能满足计算机这一类负载的要求。尽管计算机日益普及,但其用电量在电力系统中是微不足道的,也就是说电力系统不可能为计算机提供高质量的市电。相反地,大容量电动机的切除或起动、大容量变流装置运行、功率因数补偿电容器的切除和接入、雷电引起的电压瞬变等都严重地影响了计算机的正常工作。

在要求供电高度可靠和高质量供电的形势下,出现了不停电电源(Uninterruptible Power Systems)技术。不停电电源使供电系统发生明显的变化,表现在:

1) 供电可靠性大大提高。这是由于至少用两套供电系统并联对负载供电,每一套电源的切换是通过静止开关实现的。处于备用状态的电源与正在对负载供电的电源保持锁相同步,所以电源的切换不会引起任何供电的瞬间中断。采用电磁式开关是不适宜的,开关的动作时间在几十 ms 的数量级,不可能做到无瞬间中断。此外,开关接通时的弹跳和断开时的强烈电弧要产生严重的干扰,影响计算机这一类负载的正常工作。

2) 供电质量大大提高。市电频率和电力系统的负荷有关,在一个很小的范围内变化,但也有超过允差的情况。而静止逆变器可以采用石英晶体振荡器控制逆变器的频率,这一点是很多旋转机组所不能比拟的。另一方面,市电对保持电压稳定是无能为力的。因为输电线路很长,负荷的改变具有随机性,所以输电线路电压降的变化是无法控制的。不停电电源是一个电压的闭环控制系统,在规定的容量范围内,从空载到满载都能保证输出电压的偏差不超过规定的范围。输电线路所产生的各种性质的干扰,例如电压瞬变、浪涌、下跌、电压缓慢变化等都不再出现在不停电电源的输出端。

3) 投资和运行费用降低。不停电电源不需要地基和采取消振措施,效率也很高,大容量的不停电电源效率可以高达90%以上。维修的工作量很小,只限于定期的试验。在大容量的情况下,价格已低于旋转机组。

目前,不停电电源的容量虽已达到1000kVA的数量级,但过载能力还是有限的。一般的静止逆变器设计成短时间过载125~150%的额定电流,超过此数值以后,其中的“自动限流电路”就起作用,降低输出电压以维持此电流。

对于连续使用的计算机都装有高速欠压保护电路,欠压时计算机靠贮存在滤波电容中的能量维持工频的半个周期即10ms,以避免丢失数据。在此情况下不停电电源要保证连续供电是没有问题的。然而要起动计算机则不同,要从电源输出几倍正常电流的浪涌电流。如果不停电电源的容量有限,不足以提供这样大的浪涌电流,可以采用自动切换的静止开关,在

浪涌电流流过时由逆变器供电转移到市电供电，而电网的容量很大，因此基本上是在全压下对负载供电。这种转移必须在 $1/4$ cycles (周波) 内完成，以防止计算机供电中断。只要浪涌电流消失，又要求从市电供电返回到逆变器供电。这种来回转移的必要条件之一就是要使两套电源之间无相位差存在，否则，即使转移成功也会在负载上产生尖峰电压，形成干扰脉冲。

对于容量比较大的交流电动机这一类负载，其特点是过载的时间长，而自动返回逆变器供电的程序与计算机负载相同，但要避免在起动结束之前返回逆变器供电。

§ 1-2 系 统 框 图

图 1-1 是不停电供电系统的框图。它的基本结构是一套把交流电变为直流电的整流/充电装置和一套把直流电变为交流电的逆变器。蓄电池在市电正常时贮存电能，维持在一个正常的充电电平上。当市电发生故障时，由蓄电池对逆变器供电，与此同时，起动柴油发电机，等到油机运转正常以后，油机作为应急电源，取代市电继续供电。在很多场合，用户只需要在市电突然中断以后，在蓄电池供电期间进行应急处理，例如计算机的数据转贮等，可以不用油机，只要选择合适的蓄电池容量就行了。

一、整流器

不停电电源用的整流器从不可控的整流直到带平衡电抗器的双反星形可控整流都有。整流器的功能是在市电正常时或市电故障油机供电时为逆变器提供纹波很小的直流电压。因为逆变器有自动调节输出电压的能力，所以对整流器的稳压性能一般来说没有什么严格要求。直流电压的变化作为一个扰动量加入逆变器的自动电压调节系统。如果直流电压变化 $\pm 10\%$ ，而逆变器的输出电压变化 $\pm (1 \sim 2)\%$ ，就可以满足负载对供电的要求。事实上，当市电中断以后由蓄电池供电，蓄电池电压不可能保持恒定，所以逆变器应该具有适应直流电压在规定范围内变化的能力。

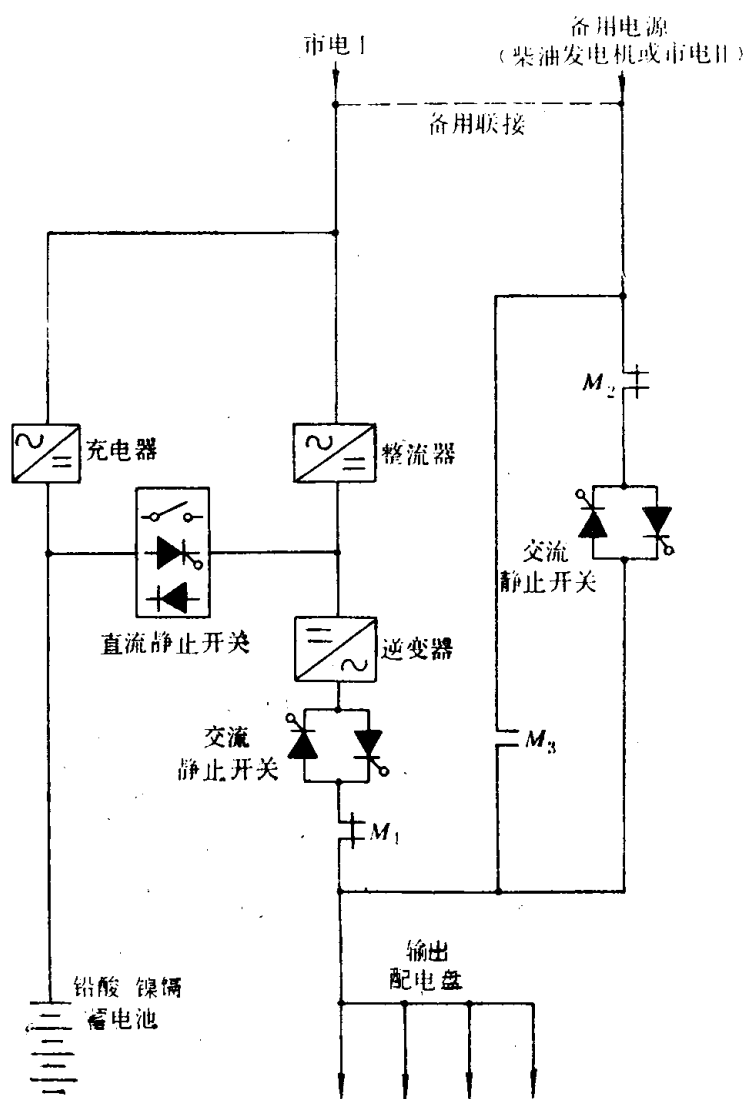


图 1-1 不停电供电系统框图

(一) 不可控整流电路

不停电电源的可靠性是十分重要的, 因此, 在满足性能指标的前提下尽量采用结构简单的电路。如果逆变器的电压调节性能好, 且在电压调节的过程中波形畸变因数又无明显的变化, 那么采用三相桥式整流电路是合适的。为了适应逆变器输入直流电压的需要, 在桥式整流电路的输入端增加一台有固定抽头的自耦调压器。

三相桥式整流电路工作可靠, 整流管的过载能力也比晶闸管强。三相桥式整流电路整流电压的脉动频率是市电频率的六倍即 300Hz。整流输出电压的瞬时值 e_d 可以表示为

$$e_d = 1.35 V_{2l} \left[1 + \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \frac{2}{143} \cos 12\omega t + \frac{2}{323} \cos 18\omega t - \frac{2}{575} \cos 24\omega t + \dots \right] \quad (1-1)$$

整流输出电压的平均值

$$E_d = 1.35 V_{2l} \quad (1-2)$$

上式中 V_{2l} 是输入整流桥的线电压有效值。由式 (1-1) 可以看出, 除了直流分量以外, 最低次谐波即 300Hz 的振幅已经很小, 采用本书第四章无源低通滤波器中所介绍的基本低通滤波器的 Γ 形半节或 T 形节就能满足要求。滤波器的串臂由电感元件组成, 而并臂由电容元件组成。实际的整流输出的滤波器都接有大容量的电容器, 这是考虑到逆变器在换流时需要直流电源提供比逆变器的负载电流大得多的脉冲电流。

(二) 可控整流电路

目前, 不停电电源的整流器仍多采用可控整流。如果希望整流输出电压比较高, 可以采用三相全控或半控桥式整流; 如果希望整流输出的电压比较低但电流比较大, 可以采用带平衡电抗器的双反星形可控整流电路。

采用可控整流电路对正弦脉宽调制这一类逆变器是很有必要的。尽管可以用改变调幅度来调节逆变器的输出电压, 但是在改变调幅度时波形畸变因数变化比较大。如果直流输入电压是不可控的, 那么在直流电压比较高、不停电电源的负载比较轻时, 波形畸变将比较严重。为此, 有必要采用可控整流使直流电压比较稳定。

1. 三相桥式半控整流电路

图 1-2 是不停电电源常用整流电路。图 1-2 b 是三相桥式半控整流电路, 与图 1-2 a 的三相桥式整流电路相比, 就是用一组共阴极的晶闸管代替相应的整流管, 其整流输出电压的平均值

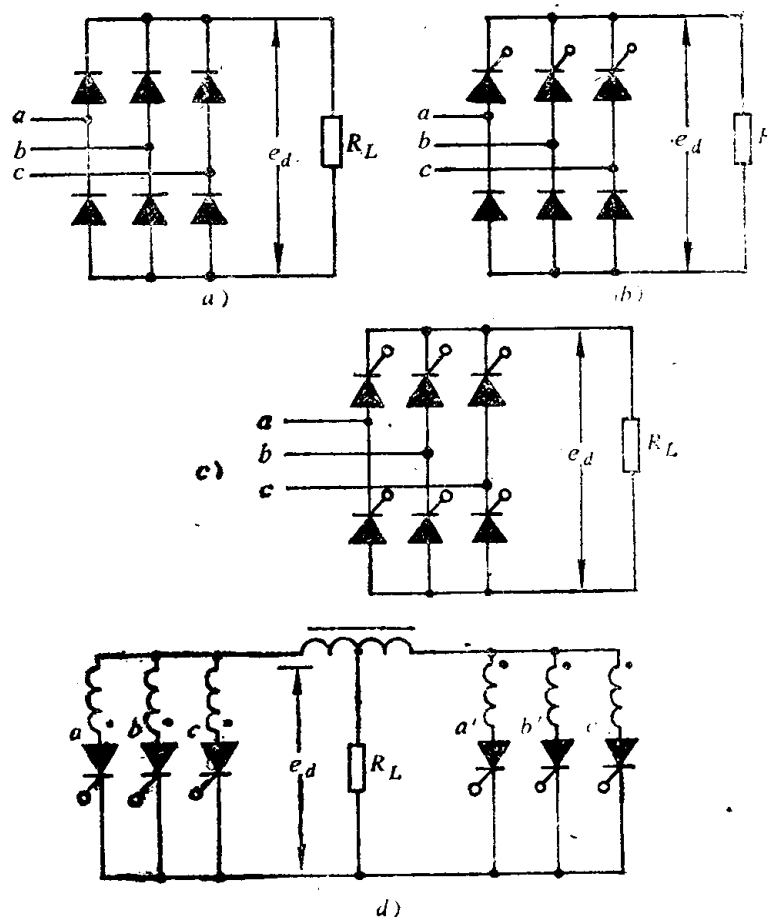


图1-2 不停电电源常用整流电路

$$E_d = 1.35V_{2l} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-3)$$

α 是晶闸管的控制角。三个晶闸管的触发脉冲之间彼此间隔 120° ，只要用三套控制电路就行了。这个电路虽然控制的灵敏度低一些，但作为逆变器用的直流电源还是足够的了。

2. 三相桥式全控整流电路 图 1-2 c 是三相桥式全控整流电路，对于电阻性负载其整流输出电压的平均值

当 $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3} \text{rad}$ 时，

$$E_d = 1.35V_{2l} \cos \alpha \quad (1-4)$$

当 $\frac{\pi}{3} \text{rad} < \alpha < \frac{2}{3}\pi \text{rad}$ 时，

$$E_d = 1.35V_{2l} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) \right] \quad (1-5)$$

三相桥式全控电路在任何时候都必须有两个晶闸管导通，而且其中的一个是共阴极组的，另一个是共阳极组的。因此就要求触发脉冲有一定的宽度，如果宽度小于 60° ，则当整流器接通电源时将不可能形成电流通路，一般取 $80^\circ \sim 100^\circ$ ，称宽脉冲触发。另一种是在触发某一个晶闸管时，同时给前一个应该导通的晶闸管补发一个脉冲，使共阴极组和共阳极组的两个应该导通的晶闸管上都有触发脉冲。这样对触发脉冲的宽度就没有严格要求，相当于用两个窄脉冲等效地代替大于 60° 的宽脉冲，这种方法称双窄脉冲触发。

三相全控桥的控制灵敏度比三相半控桥高，其整流输出的平均电压在空载和满载时的变化可以做到小于 1%。整流电压的脉动也比三相半控桥小，因此，滤波器的尺寸也可以小一些。

3. 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路 这种电路如图 1-2 d 所示，是由两组三相半波可控整流电路并联而成，每组只供给总负载电流的一半，而桥式整流电路共阴极组或共阳极组都要通过全部负载电流。整流输出电压的平均值（电阻性负载）

当 $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3} \text{rad}$ 时，

$$E_d = 1.17V_{2p} \cos \alpha \quad (1-6)$$

当 $\frac{\pi}{3} \text{rad} < \alpha < \frac{2}{3}\pi \text{rad}$ 时，

$$E_d = 1.17V_{2p} \left[1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right] \quad (1-7)$$

由式 (1-4) 至式 (1-7) 可以看出，在变压器副边的相电压 (V_2) 相同的情形下，这种电路整流输出电压的平均值只有桥式全控整流电路的一半。在大功率的情况下，为了避免晶闸管并联带来的均流问题可以考虑采用这种方案。但是这种电路当负载电流很小时，外特性较差，而且采用平衡电抗器增加了设备的体积和重量。

二、蓄电池、充电器

目前，广泛使用的贮存电能的装置只有蓄电池。如果没有蓄电池，要想用静止逆变器解决不间断供电是不可能的。市电中断以后，靠已经贮存在蓄电池中的电能维持逆变器的正常工作。蓄电池需要直流电源预先给它充电，将电能转换为化学能而贮存起来，当放电时又将

化学能转换为电能供外电路使用。**放电后能用充电的方法使活性物质再生**，因而蓄电池是一种可逆电池。

(一) 蓄电池的充电和放电

新电池在安装完毕后要进行一次较长时间的充电叫做初充电。初充电电流大小应按说明书规定选择，或按额定容量 $1/10$ 的电流进行充电。蓄电池在放电终了后进行的充电叫做正常充电。正常充电最好采用分级定流充电法，即在充电初期用较大的电流，经过一定时间改用较小的电流，至充电后期改用更小的电流。这种充电法所需充电时间较短，充电效果也好，并且对延长电池使用年限有利。

均衡充电也叫做过充电。蓄电池在正常使用过程中会产生比重、端电压等不均衡的情况，为防止这种不均衡扩展成为落后电池（电压过低）甚至反极性，所以在一定时期内应进行均衡充电，使每个电池都达到均衡一致的良好状态。此外，遇有下列情况之一时，应及时进行均衡充电：

- 过量放电使端电压低于规定的终了电压；
- 放电后未及时进行充电的电池；
- 市电中断，连续浮充电池放出近一半容量的电池；
- 长期静置不用的电池。

不停电电源用的蓄电池按连续浮充制供电方式工作。连续浮充制是指充电用整流器和蓄电池并联供电的工作方式。浮充过程负载电流全部由整流设备供给，这时蓄电池组接受整流设备的部分电流作为补充电池局部放电的消耗，蓄电池对负载不供出电能，在电路上只起平滑滤波作用。这种平滑滤波作用对逆变器的正常工作是非常重要的。有些逆变器工作时被关断的晶闸管往往要承受很高的反向电压和正向重加电压，其数值与直流电源电压有关。如果整流输出电压未经很好的平滑滤波，极易造成逆变失败，烧毁晶闸管。

连续浮充制供电方式除了经常保持有一微小充电电流用以补偿电池的局部放电外，当不停电电源的负载突然增加，蓄电池也可以在短时间内提供放电电流，因而改善了不停电电源的暂态响应特性。关于蓄电池维护方面的问题，读者可参阅有关的专门书籍。

(二) 不停电电源蓄电池的选择

蓄电池必须能够在一段时间之内供电给逆变器，并且在额定负载下电压不应该下降至逆变器所要求的最低电压以下。对数据处理系统的供电，一般只需要短短几分钟到半小时，而如炼油厂、无人操作输油站和医院等的检测 and 控制系统则须由蓄电池供电几小时。

各种铅酸和镍镉蓄电池均可采用。哪一种蓄电池最适用，这取决于许多因素，例如蓄电池备用时间、价格、容量、重量、空间条件（必要而有效的蓄电池室）、保养、使用寿命、充分利用的容量与标称容量的比率等。特别是在蓄电池较短的备用期内，其可用容量只是所配备的标称蓄电池容量的一小部分，而某些蓄电池尤其适合于短放电期使用。只有在考虑了上述这些因素以后，才能对蓄电池进行最佳选择。

蓄电池的容量就是蓄电池的蓄电能力。通常以充电充足后的蓄电池，放电到端电压到达规定放电终了电压时，电池所放出的总电量来表示，即放电电流与放电时间的乘积，单位为 $A \cdot h$ 。

蓄电池的最大放电电流可以由下式求得

$$I = \frac{S \cos \phi}{\eta E_1} \quad (1-8)$$

式中 S —— 不停电电源视在功率;
 $\cos\phi$ —— 负载功率因数, 一般取 0.8;
 η —— 逆变器效率, 一般取 80%;
 E_1 —— 蓄电池放电终了电压。

例如一 30kVA 的不停电电源, 配置蓄电池组, 共有蓄电池 112 只。

浮充电压 $2.15\text{ V} \times 112 = 240\text{ V}$

均衡电压 $2.25\text{ V} \times 112 = 252\text{ V}$

放电终了电压 $1.75\text{ V} \times 112 = 196\text{ V}$

把数据代入式 (1-8), 可以得蓄电池的最大放电电流 $I = 153\text{ A}$ 。

市电中断以后, 由蓄电池对逆变器供电, 等到柴油发电机起动以后再由油机供电。油机除对不停电电源负载供电外, 还需对蓄电池均衡充电, 如果油机容量不适当加大, 则突加负载以后, 油机速度会降低, 其输出电压及频率也会过低, 不停电系统有可能再次转入蓄电池供电, 这一点在设计时应该考虑到。

由求得的蓄电池最大放电电流, 再根据负载的性质, 可以决定蓄电池所需的放电时间, 于是求得蓄电池的容量。

实际上, 充电器/整流器单元电路早在多年前已经完成, 并且实现标准化了。不停电电源用的充电器, 有的是单独设置的, 但也有为了简化电路, 不采用单独的充电整流器, 仅配置一台浮充整流器, 当电池放电后用提高浮充电压的方式给电池充电, 电池电压恢复的时间要长一些, 这时整流器的输出电压为均衡电压。蓄电池初充电时其最高输出电压可能要高出均衡电压, 这是应该注意的。

在电路设计上, 如果充分了解不停电电源各部分的功能, 那么就有可能采用一些简单电路而得到相同的性能指标。

例如整流器采用不可控的三相桥式整流电路, 由整流器对蓄电池提供一个未经调整的整流电压, 并且在市电电压上升 10% 时, 使蓄电池每节电压的最大值为 2.15 V。整流变压器也可以用自耦调压器来代替, 自耦调压器只是在蓄电池初充电时提供一个较高的输入电压。初充电结束以后按正常市电电压经整流器对逆变器供电, 这时图 1-1 中直流静止开关中的二极管处于反向偏置状态。充电器是一个容量比整流器小得多的三相半控桥式整流电路。充电器只向蓄电池提供浮充电压所需的微小充电电流。实际上, 浮充电电流还不到初充电电流的 1%。充电器可以保持蓄电池电压稳定在 $\pm 0.5\%$ 的范围内。于是, 在下列情况下, 很容易将市电供电转换到蓄电池供电:

市电电压的变化超过容限;

整流器故障;

市电中断。

上述转换只要通过传感器, 发出一触发脉冲, 使直流静止开关中的晶闸管导通即可。

如果市电中断不超过 1min, 市电恢复以后蓄电池停止供电, 整流器和充电器以浮充电压对蓄电池充电。市电中断超过 1min, 最好进行一次均衡充电, 充电器以自动升压充电方式充电, 使每一节电池的电压为 $2.25\text{ V} \pm 0.5\%$, 这样可以使蓄电池始终保持良好的状态。

虽然充电器和蓄电池电路比较简单, 但却是需要经常维护的部分, 在不停电电源中的重要性也是勿容置疑的, 应使其经常处于良好的备用状态。

三、自动切换电路

不停电电源能够实现不间断地对负载供电，可以说是电力电子技术巧妙结合的产物。依靠精密的检测技术可以及时发现供电的频率、电压、电流是否在允许范围之内。建立在控制理论基础上的逆变器电压调节系统，使输出电压保持稳定；同样也是建立在控制理论基础上的锁相技术，不仅使两个电源之间无稳态频差，也可以使两个电源之间无稳态相位差。有了以上这些技术，还需要大功率晶闸管作为静止开关进行快速切换，这种切换是电磁式开关无法实现的。

(一) 市电及备用电源阈值检测

不停电电源应该对市电及备用电源（油机或另一路市电）的幅值连续进行检测，其目的是要判断应该由哪一路电源（包括蓄电池在内）向逆变器供电。

当市电中断或其幅值低于规定的数值（例如低于额定值的 20%）时，逆变器必须迅速转换到蓄电池供电；如果整流器发生故障，逆变器也必须迅速转换到蓄电池供电。

图 1-3 a 是对备用电源检测的框图。对备用电源的检测不能忽视，只有备用电源的质量

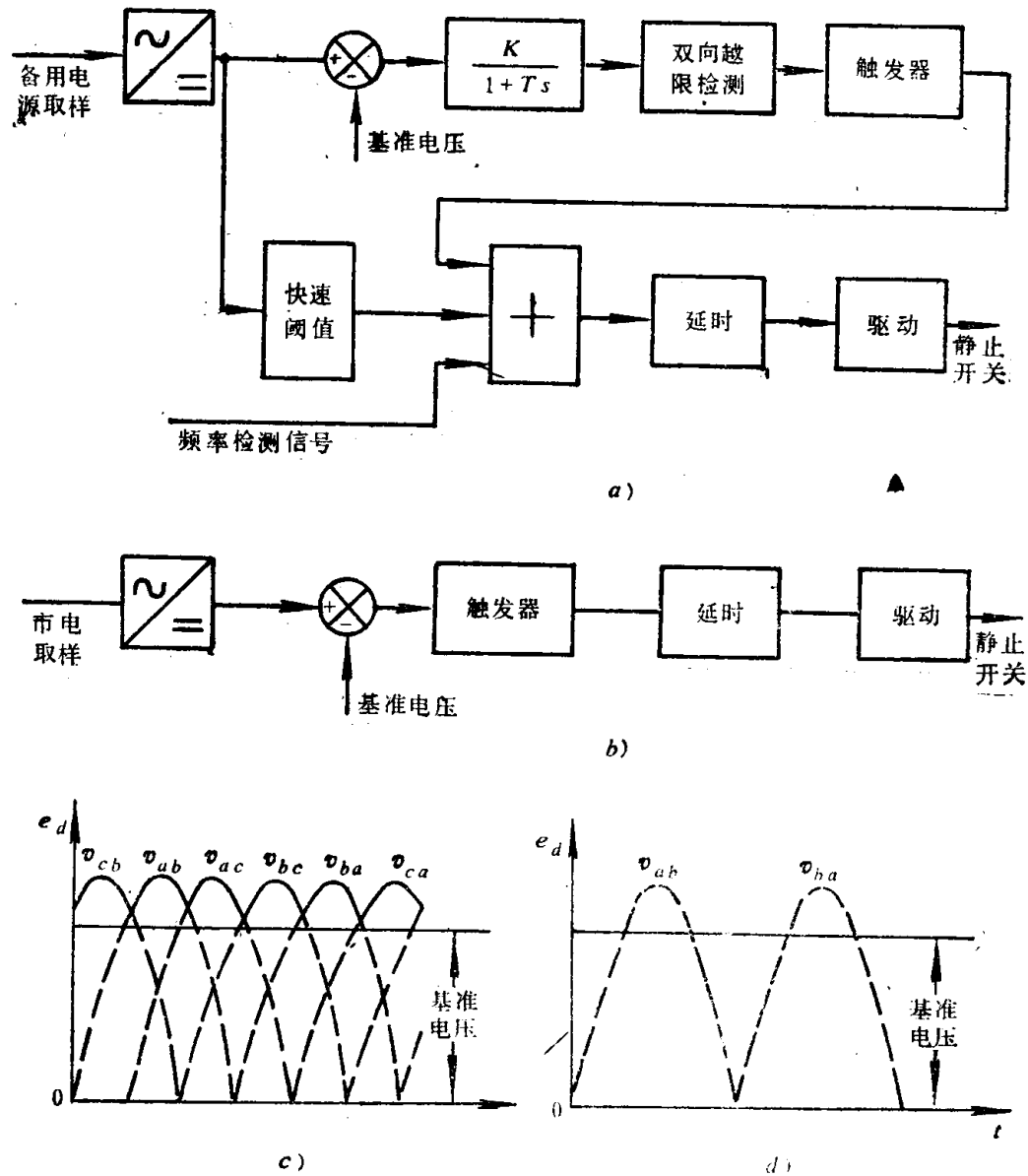


图1-3 市电及备用电源阈值检测

(电压幅值和频率) 满足要求以后, 才能在市电故障时切换到备用电源供电。对电压的检测应该分为两种情况: 一种是电压缓慢变化, 但变化超过允许范围 (例如 $\pm 10\%$); 另一种是短时间内不正常就要检测出来去控制切换。缓慢变化检测是将三相电压经降压变压器、桥式整流所得到的输入信号与基准电压 (和额定值相对应) 进行比较。经三相桥式整流所得到的输入信号如图 1-3 c 的实线所示, 它实际上与线电压的包络线相对应。比较后得到的误差电压经放大、滤波、双向越限检测后控制触发器。触发器的输出送到或门的一个输入端。放大器的增益 K 是可以调节的, 便于生产厂和用户根据实际情况选择合适的阈值。滤波器的时间常数 T 可以选择为 1 s 左右。

如果备用电源发生缺相或瞬间供电中断的情况, 需要立即控制静止开关的切换。缺相的情况如图 1-3 d 所示。设置一基准电压, 将三相桥式整流的输出信号与之比较, 在正常供电时, 线电压的包络线始终高于基准电压, 但只要有缺相发生, 线电压的包络线就有低于基准电压的时候, 利用这个特点可以对每一个周波进行检测。为了避免偶然因素引起的几个周波的严重下跌也作为缺相处理, 增加延时电路, 延时电路起到存贮过去发生过的信息的作用, 因此避免了静止开关的来回切换。

备用电源如果是柴油发电机, 还应该对电源频率进行检测。只要电源频率不能满足要求, 通过或门电路禁止备用电源投入供电。

市电的检测如图 1-3 b 所示。市电检测比备用电源简单, 只要检测市电电压是否低于某一个数值即可, 例如额定值的 80% 。市电电压过低, 在开机时应该禁止起动逆变器; 在不停电电源运行中应该停止市电供电, 切换为蓄电池供电。市电恢复正常后, 不能立即返回市电供电, 经过 200 ms 左右的延时, 市电确已稳定, 再返回市电供电。

(二) 正常/应急转换

任何一台不停电电源除了静止开关以外, 还有一些电磁或手动的机械开关。通过控制这些开关, 保证不停电电源能够在各种情况下工作。

在正常情况下, 逆变器是从整流器获取电能。如果备用电源是市电, 那么逆变器应该与备用电源保持锁相同步。当出现逆变器故障或发生超载时, 临界负载就会自动地通过静止开关接通备用电源, 转换时间不超过 1 ms , 在这种情况下, 将不会出现负载供电的中断。这一特性对于有很大起动电流的负载是非常有用的, 因为逆变器的容量有限, 起动负载时可能使逆变器的限流电路动作。此外, 当负载故障的时候, 由市电提供强大的电流使保护装置动作。

考虑到不停电电源本身发生故障以及定期的维护, 系统中还设有人工旁路开关, 见图 1-1。

四、逆变器

静止式不停电电源得以实现, 和逆变器的进展是分不开的。逆变器可以提供频率非常稳定、输出电压受负载影响很小、波形畸变因数满足要求的交流电。虽然逆变器电路已经考虑到最大限度抑制低次谐波, 但设计良好的逆变器, 它的输出电压波形畸变因数仍在 10% 左右, 为了满足波形畸变因数小于 5% , 必须增加滤波器环节, 滤波器对逆变器的特性有很大影响:

- 1) 抑制逆变器输出电压中的谐波;
- 2) 影响负载浪涌期间输出电压的暂态特性;

- 3) 限制负载短路时浪涌电流的上升率;
- 4) 影响非线性负载能力;
- 5) 滤波器电路有“续流”效应,在不停电电源系统里当逆变器供电转移到备用电源供电时,“续流”效应有助于向负载不间断供电。

以上所述,都要求滤波器电路具有一定的最小容量。以谐波抑制为基础的滤波器设计,如果顾及到对滤波器的其它要求,尚需由实验来修正。

除了三相负载相同以外,不停电电源也可能对不平衡负载供电,例如仅接入单相负载就形成三相不平衡负载。如果把滤波器的串臂电感和逆变器的输出阻抗合并表示为 R_A 、 L_A 、 R_B 、 L_B 、 R_C 、 L_C (图 1-4 a),那么在单相负载时,不停电电源输出电压的相量图如图 1-4 b 所示,表现出明显的不对称。这种情形在对称驱动的电控系统里,例如三相逆变桥是无法克服的。在不平衡负载下,线路上具有不相等的电压降,结果使负载电压系统产生失真。用户在使用这种类型的不停电电源时(中小容量的不停电电源几乎都是这种类型的),应该注意到这一点,不要在三相不停电电源上接入大容量单相负载。

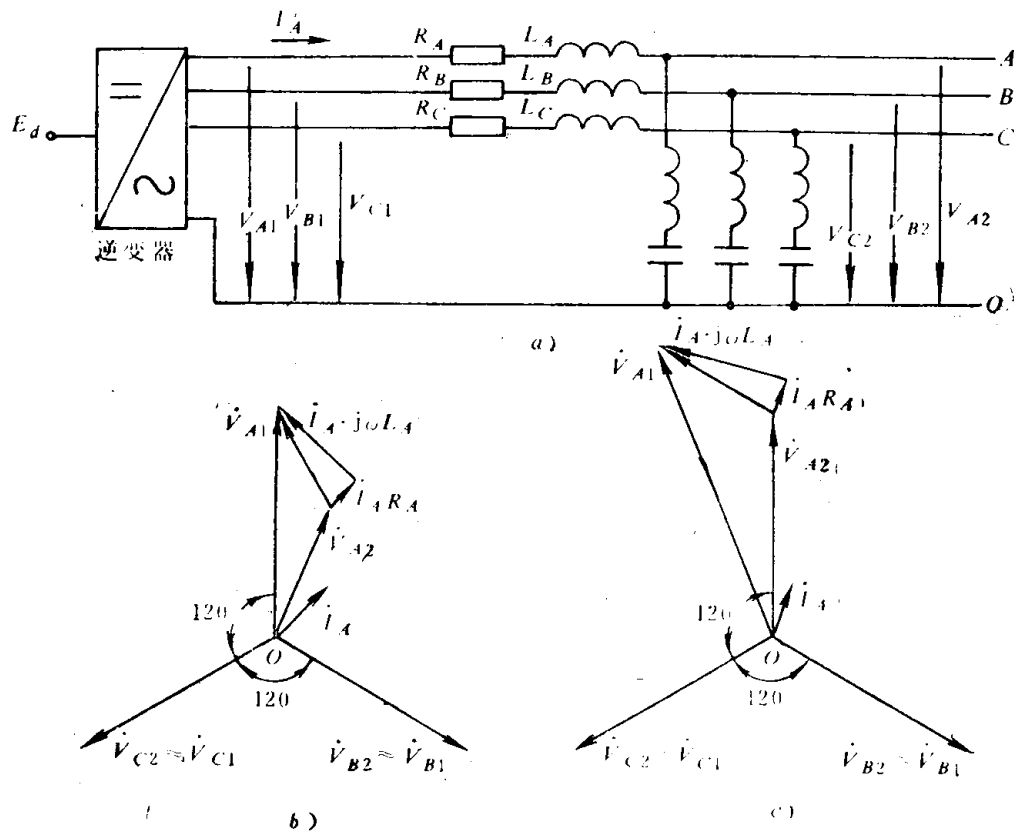


图1-4 不停电电源接有不平衡负载

要在不平衡负载情况下使负载电压的幅值和相位保持在允许的范围内,那么逆变器的设计就必须考虑到每一相都能单独调整,在每一相电压的幅值和相位分别控制的情况下,可以做到三相负载电压始终是对称的,如图 1-4 c 所示。这就增加了控制电路的复杂性,但是在大容量的不停电电源里,已不容易从三相逆变桥获得这样大的功率输出,而是由一些独立的单相电源组合、集中控制而成,具有单相调整的能力。事实上,大容量的不停电电源也必须具备这种能力。

静止逆变器与旋转的发电机相比,更容易实现频率的控制。但是自动同步也可能出现问题,这就是市电的电压正常而频率不正常,也可能是备用电源柴油发电机的频率不正常,但

自动同步电路强迫逆变器跟踪不正确的频率, 因此影响了负载的运行, 有时引起逆变器的故障。要解决这个问题, 可以从精密频率检测电路发现与容许频差多少, 再决定逆变器是否跟踪市电或油机。不少不停电电源并不具有精密频率检测的功能。对计算机来说, 频率偏差的极限是 $\pm 0.5\%$ 。

另一个问题是某些负载不能跟踪频率的变化率。这种情况发生在同步信号加入或取消时不受控制的静止逆变器系统。因为逆变器无运动部件, 在同步信号加入时, 它可以瞬时地改变频率, 力图使逆变器与同步信号同步。这样, 对于象同步电动机这一类负载, 它不能跟踪这样快的频率变化, 造成失步。还有, 某些计算机的消噪电路也不能容许频率的快速变化。

因此, 频率同步电路应设计成 1Hz/s 数量级的变化率, 某些计算机还要求慢两个数量级。

§ 1-3 可靠性 备用性 性能指标

当用户决定采用不停电电源时, 这意味着他希望有一个具有比工业电网即市电较高质量的能源。这样, 可靠性不仅意味着概率, 而且也意味着供电的质量, 即不仅是停电或断路, 就是所要求的特性中有一个或几个瞬时地超过允差 (这些瞬时超过允差的测试手段现在已经完备了, 本书将在第六章中介绍) 也被认为是一个故障。

要求不停电电源的可靠性和计算机一样, 达到某一确定的目标 (例如, 对于 200kVA 的逆变器平均无故障工作时间为 25000h), 就必须建立相当大的质量控制机构。在设计前决定可靠性要求, 对电路进行设计计算, 保证稳定性是足够的。将设计的元件标准化, 做出样机, 测试是否满足可靠性要求, 生产时对元件进行筛选, 从各方面控制制造过程。

同故障率同样重要的是维修平均时间, 而维修时间又取决于测试工具和个人的技术训练。当然, 已经发展的微型计算机自动检测系统对缩短维修时间起了重要作用, 也降低了对维修人员的技术要求。

一、有关可靠性的术语

很多使用不停电电源的部门都是对供电可靠性有特殊要求的, 如果供电中断就会造成巨大的损失。但是对不停电电源的可靠性究竟如何衡量, 必须有一个定量的概念。按照可靠性的定义: 一个设备在给定的时间内, 在预期的应用中能正常工作的概率。其中包括四个要素: 给定时间、预期应用、正常工作和概率。概率是一种定量量度, 它表明一个特定事件 (这里指正常工作) 出现的可能性的的大小。

若将总数为 N_r 的大量相同元件进行试验, 则任一时刻 t 的可靠度 $R(t)$ 便等于该时刻仍然工作的元件数 N_s 与最初的元件总数 N_r 之比, 即

$$R(t) = \frac{N_s}{N_r} \quad (1-9)$$

因为仍然工作的元件数等于总数 N_r 减去失效元件数 N_f , 故上式可写成

$$R(t) = 1 - \frac{N_f}{N_r} = 1 - Q(t) \quad (1-10)$$

式中 $Q(t) = \frac{N_f}{N_r}$ 称为失效概率 (即发生故障的概率)。

设若 $Q(t)$ 有导函数 $q(t)$:

$$q(t) = \dot{Q}(t) = -\dot{R}(t) \quad (1-11)$$

称为失效密度函数，它表示单位时间内的失效元件数，即元件失效随时间的分布密度。

在 $(t, t + \Delta t)$ 内的失效概率设为 $Q(t, t + \Delta t)$ ，可以求得

$$Q(t, t + \Delta t) \approx \lambda(t) \Delta t \quad (1-12)$$

式中 $\lambda = \frac{q(t)}{1 - Q(t)} = \frac{q(t)}{R(t)} = -\frac{\dot{R}(t)}{R(t)}$ 称为设备失效率。 $\lambda(t)$ 越大，则在 $(t, t + \Delta t)$ 时间内出现故障的条件概率也越大。

按照可靠性的定义，可靠性是指设备运行了一定时间之后还保持完好的概率。由于不停电电源没有一个预期的工作时间，而是要连续不断地工作，所以使用失效率（或下面要提到的平均无故障工作时间）更可取。

设备失效通常有三种类型：第一，早期失效，在设备工作的初期就发生。出自设计方面的原因是设备未经严格的考核，或考核的项目与手段不全，例如不停电电源的内外同步切换，仅就切换前后电源是否正常供电来评价是不够的。因为供电的瞬间中断是计算机这一类负载所不能接受的，这时用户就认为是电源的一次故障。如果用“电源扰动分析仪”进行监测，或在设计的试验阶段用示波器进行观察，那么这个问题在设计阶段就可以解决。属于制造或检验方面的错误也是造成早期失效的原因。不停电电源里大量的电子元件可以通过老化试验，挑出有隐患的元件。值得注意的是逆变器中的晶闸管工作在强迫换流的开关状态，除了设计时选择合适型号的晶闸管以外，产品出厂前一定要经过全负载的试验，这种全负载试验至少要经过24 h，周围环境温度不能低于产品实际使用的环境温度。总之，出厂前通过恶劣条件试验但又不至于引起损伤的产品，早期失效往往是可以减少的。尽管采取各种措施来提高产品的可靠性，产品的早期失效率 $\lambda(t)$ 还是比较大，并随时间呈下降趋势。人们在生产和生活实践中也总结出这一规律。

第二是随机失效。如上所述，早期失效多是人为的因素造成的，因此在研究设计的可靠性时可以不考虑。当设备已进入正常工作期间由于偶然的原因而出现的失效，称为随机失效，这一阶段设备工作稳定， $\lambda(t)$ 基本上是常数。在可靠性分析中，还用到平均无故障工作时间 m_t 。 m_t 为失效密度函数与时间的乘积对时间的积分：

$$m_t = \int_0^{\infty} t q(t) dt \quad (1-13)$$

当元件有恒定失效率时

$$m_t = \frac{1}{\lambda} \quad (1-14)$$

第三是耗损失效。由于元件或设备的寿命限制，失效率在工作后期随时间逐渐增加。

二、不停电电源的可靠性和备用性

任何依靠单一电源供电的系统可靠性都是不高的。从可靠性工程学的观点看，单一电源供电意味着依靠一个串联的系统供电。这里串联的意义并非电路的串、并联。例如由市电的三相对异步电动机供电，在电路上三相电源对负载并非串联的关系，但从可靠性的观点看，三相电源是串联的，因为其中任何一相断路就会使电动机不能正常工作。即一个系统中所包含的子系统或元、部件完成的功能是不同的，其中的一个子系统或元、部件失效，就使整个系统失效。从可靠性的意义上来说，这些子系统和元、部件都是串联的。如果用 λ 和 λ_i 分

别表示整个系统和第 i 个元件的失效率, 这时有 n 个元件的系统的平均无故障时间为

$$m_i = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_n} \quad (1-15)$$

可见, 串联的元件越多, 或元件的可靠度越差, 系统的平均无故障工作时间就越短, 系统的可靠性就越差。

为了提高可靠性, 不停电电源采用两种方案:

1) 时序备用或者称为市电应急功能: 即当市电正常时, 逆变器与市电锁相同步, 逆变器与市电都可以通过静止开关向负载供电, 要求市电电压也比较稳定。当市电作应急电源时, 要求逆变器具有最低的平均维修时间。从可靠性工程学来看, 逆变器与市电组成一个并联系统。即如果一个系统由几个子系统或元、部件构成, 而各子系统或元部件完成的任务是相同的, 并且只有当组成该系统的全部子系统或元部件都失效时, 整个系统才失效, 则认为这些子系统或元、部件是并联的。如果增加备用电源, 也就增加了系统的可靠性。

2) 并联备用性: 原理是把总功率分成几个基本单元, 每个单元的额定功率为 P , 再加一个单元作为备用, 于是具有一个多余的单元。当一个单元故障时, 总负载不应超过减少一个单元时的总容量。故障单元的隔离是通过快速熔断器或静止开关来实现的。图 1-5 是具有并联备用性的不停电电源原理图。按照可靠性工程学, 并联备用性是属于容许一个或多个单元失效的 n 单元并联系统。这种系统的可靠性高, 不仅是因为 n 个单元均不失效时有很高的可靠性, 还由于允许 n 个单元中的任一单元失效, 系统还能继续工作。当然, 容许有两个单元失效的系统可靠性更高, 不过也要考虑到经济因素。

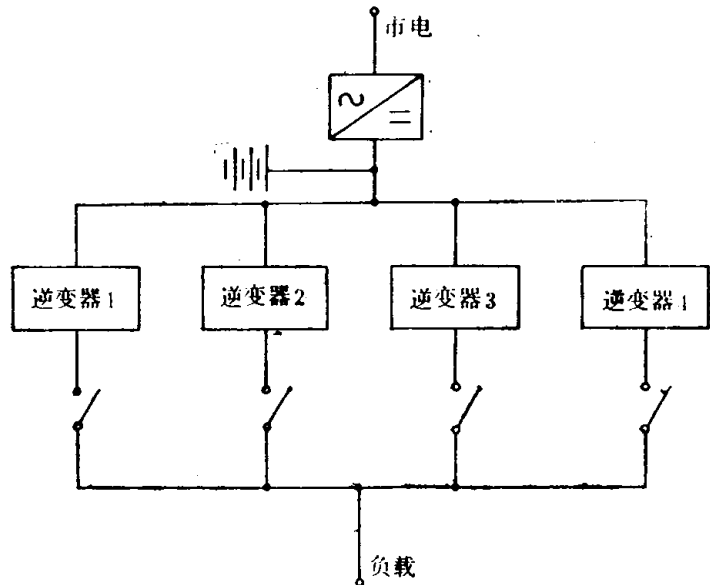


图1-5 具有并联备用性的不停电电源

三、计算机供电中心不停电电源的考虑

对于要求连续供电的计算机, 按照要求可以采用不同的方案。

(一) 静止开关旁路系统

这是一种最简单的提高可靠性的时序备用系统。图 1-6 是这种系统的框图。在正常运行时, 市电通过整流器—逆变器向计算机供电。大多数计算机都要求电源的频率和电压在一个很小的范围内变化。只有静止逆变器通过闭环的电压调节系统才能保持电压的稳定, 而逆变器的频率是不受负载影响的, 它只决定于参考振荡器的精度。现代用于连续控制的计算机, 都配备高速的欠压保护电路, 计算

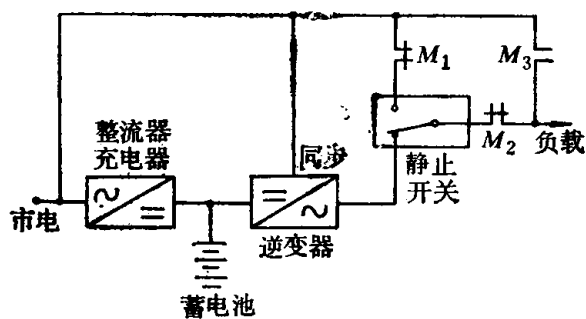


图1-6 静止开关旁路系统