



◇汪东 邓焯 何湘宁 / 浙江大学电气工程学院

UPS 电源系统的并联技术与电池管理

分析了UPS并联的基本原理与电池失效的机理,介绍了UPS并联与电池管理技术发展过程中出现的几种检测与控制方案,并针对各种方案的优缺点讨论了今后UPS电源的发展趋势。

随着现代高科技的发展,计算机和高精度仪器设备的大量使用,用电设备对电网的要求也越来越高,高次谐波的干扰、瞬间断电和高能浪涌都是不可接受的。因此,现代用电设备对供电可靠性和供电质量提出了越来越高的要求。同时,非线性负载设备的广泛应用,向电网注入了大量的谐波,严重影响电网的质量。因此,高性能的UPS (Uninterruptible Power Supply) 越来越广泛地应用于银行、邮电通信、航空航天、证券、军事等重要部门。UPS的应用,不仅改善了电网质量,同时也提高了用电系统的可靠性。

自从20世纪70年代,我国引入UPS电源设备以来,UPS电源经过了许多代的发

展。国内现有的UPS电源技术已达到了一个新的水平。但是,随着用户对UPS性能和可靠性的要求日益提高,传统的单台UPS已经不能满足系统的要求。因此,下述方案成为新型UPS电源的重要技术,它们是:①N+1并联冗余技术。②UPS结构的模块化技术。③先进的电池管理技术。

UPS电源并联技术是提高逆变电源运行的可靠性和扩大供电容量的重要手段。当前大容量的逆变电源的发展趋势是采用全控高频开关器件构成逆变电源模块单元再通过多个模块并联运行扩容。研究表明:采用N+1冗余并联是一种很好的解决方案。实现冗余并联的主要优点如下:①可以方便地提高系统的容量。②可以通过并联实现冗

余,提高可靠性。③可以提高系统的可维护性。④容易实现模块化和标准化。

模块化的结构设计是 UPS 并联技术发展的必然趋势:并联冗余技术允许用户分阶段投资,方便实现升级扩容与在线维护。模块化与标准化设计易于实现热插拔,提高系统的兼容性,减少了人为故障的概率。模块化的结构设计也有利于减少系统的使用空间,提高电源的功率密度。

电池的合理使用与维护是影响 UPS 可靠性的又一重要因素。蓄电池在 UPS 系统中起着储备电能、应付电网异常和维持系统正常运转的关键作用,是保障高可靠供电的最后一道防线。因电池问题造成的事故或停机的损失往往远比电池本身价值要高昂得多。根据美国空军 1996 年对于数据中心的数据丢失事故的统计结果显示,有 27.7% 的数据丢失事故是由于 UPS 故障所导致,其中 95% 的 UPS 故障与蓄电池有关。

目前,国内外已有众多的研究机构和公司开发和应用了新的方法和技术,本文主要是对上述三方面进行介绍和讨论。

逆变器并联技术及其控制策略

图 1 是两台并联逆变器的等效电路图。其中 u_1 、 u_2 为逆变桥的输出 PWM 波的基波分量; u_{o1} 、 u_{o2} 为逆变电源的输出电压; r_{o1} 、 r_{o2} 为表征电感内阻线路阻抗等逆变电源损耗因素的等效阻抗; r_1 、 r_2 为并联线的线路阻抗; L_1 、 L_2 、 C_1 、 C_2 为逆变电源的滤波电感和电容; Z 为两台逆变电源的公共负载,可为感性、容性或纯阻性。

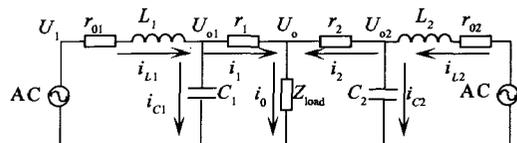


图 1 并联逆变电源的等效电路

$$\text{当} \begin{cases} r_{o1}=r_{o2}=r_0 \\ r_1=r_2=r \\ L_1=L_2=L \\ C_1=C_2=C \end{cases} \quad (1)$$

定义环流

$$i_H=(i_1-i_2)/2 \quad (2)$$

由环流定义式(2)可得出逆变电源并联运行系统环流 S 域表达式为

$$i_H(s)=\frac{U_1(s)-U_2(s)}{2[r+r_0+sL+rsC(r_0+sL)]} \quad (3)$$

式(3)中,若忽略 r 和 r_0 ,则可以简化为

$$i_H(s)=\frac{U_1(s)-U_2(s)}{2Ls} \quad (4)$$

当 u_1 与 u_2 只存在幅值差异,则此电压差与逆变输出电压同相位,如图 2a 所示。由于电感电流滞后电压 90° ,因此,此时的环流主要是无功分量。当 u_1 与 u_2 只存在相位差异,则此电压差比逆变输出电压超前 90° ,如图 2b 所示,环流电流与逆变电压同相位,因此,此时的环流主要是有功分量。

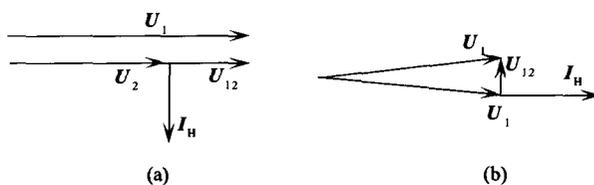


图 2 并联逆变电源输出电压存在压差与相移时电压与电流的矢量图

由于环流 i_H 的存在使各逆变电源的输出电流不仅包含有效负载电流分量,还有环流分量。在不同状况下环流分量相对于各逆变电源呈现出不同的负载特性,或为有功或为无功;环流分量改变了各逆变电源的输出电流也相应改变了各逆变电源的输出功率,使各逆变电源所承担的负载不均衡。

从以上的分析可得出结论:实现逆变电源的并联,必须保证各逆变器输出电压的幅值、频率、相位的一致,保证各个模块按预先设定比例均分有功和无功电流,使输出环流等于 0。

目前所见文献中,主要的并联方案总结如下:

(1) 集中控制并联方案 (Concentrated Control)^[1]

集中控制并联方案是一种较早提出的方案,在该方案中,并联控制模块检测市电频率和相位,同时向每个逆变器发出同步信号。当市电掉电时,每个逆变器的锁相环电路保证输出电压的频率和相位的一致。并联控制模块同时还检测负载电流,除以参与并联逆变器的台数,作为每台逆变器的电流参考指令。同时,每台逆变器检测自身的输出电流,与平均电流求误差用以补偿参考电压指令,消除环流。图 3 是集

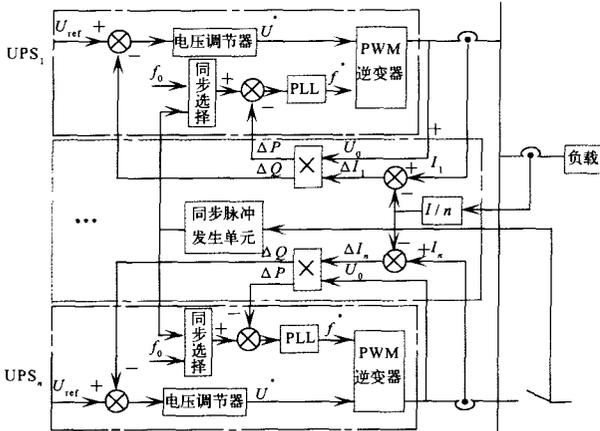


图3 集中控制系统原理框图

中控制并联方案的原理框图。

集中控制并联方案实现简单，均流效果也较好，但是并没有实现真正的冗余，并联控制器一旦故障，则整个系统崩溃，可靠性大大降低。

(2) 主从控制并联方案 (Master-Slave Control)^[2]

主从控制并联方案是从集中控制并联方案衍生而来，其主要改进之处在于可以通过模式选择开关、软件设定、硬件指定或工作状态进行主、从模块间的切换，从而避免了集中控制模式中由于控制器发生故障导致系统崩溃的可能。

主从式并联系统，由一个电压控制PWM逆变器(VCPI)单元、数个电流控制PWM逆变器(CCPI)单元和功率分配中心(PDC)单元组成并联系统。图4是功率分配中心控制并联方案的控制框图，图5是该方案的等效电路图，它包括：①一个VCPI，主控单元，其电压调节器保证系统输出幅度、频率稳定的正弦电压。②N个CCPI从单元，设计其具有电流跟随器性质，分别跟随PDC单元分配的电流。③PDC单元检测负载电流，并平均分配给各CCPI单元，且是同步的。

VCPI单元通过锁相环(PLL)使其正弦输出电压与市电或自身产生的基准电压信号同步、而输出电流取决于负载性质。它与常规的逆变器或UPS无异。

主从控制并联方案不需要PLL电路，因为CCPI模块会自动跟随VCPI模块的频率变化，自动实现锁相功能。主从控制并联方案的特点如下：

1) 优点 ①控制简单，无需复杂的均流控制电路，实现相对比较容易。②整个系统的稳定性和控制精度较好，动态性能良好，对线性负载和非线性负载都有较好的均流能力。③可以方便地实现功率的控制和分配。

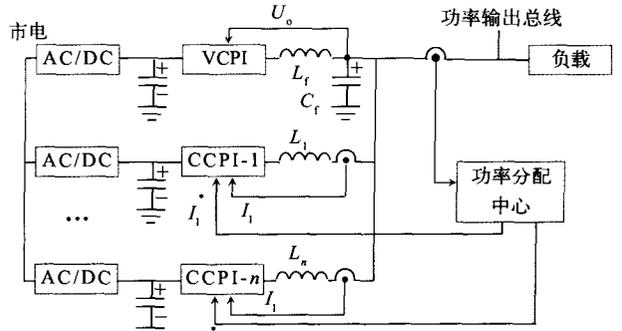


图4 主从控制系统原理框图

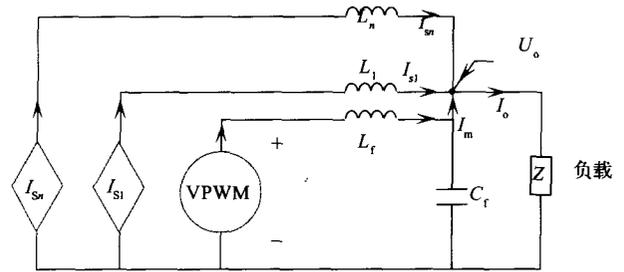


图5 主从控制并联系统等效电路

2) 缺点 ①由于有主从模块之分，同时需要额外的控制器，整个系统中各个模块并不是地位均等，一旦控制器发生故障，则整个系统崩溃，并没有实现真正的冗余。②主从模块进行切换时，由于基准正弦波幅值和相位的差异，容易产生很大的瞬时环流。主从模块切换不顺利是造成系统崩溃的重要因素。

(3) 分布式控制并联方案 (Distributed Control) 分布式控制并联方案也称分散逻辑控制并联方案 (Distributed Logic Control)。分布式并联控制是一种真正的冗余控制方法。其中任何一个模块的加入和退出都不会影响这个系统的运行。

在目前所见的文献中，分布式控制并联方案主要包括平均电流瞬时控制方案和有功无功控制方案。

1) 平均电流瞬时控制方案^[3, 4]

平均电流瞬时控制方案一般通过锁相环电路保证各个模块基准电压的严格同步，通过求出各个模块输出电流的瞬时平均值进行电流的调节，因此该方案中一般需要控制互联线。图6是平均电流瞬时值控制的原理框图。

该控制方案的特点如下：①采用两条并联控制线：输出电流平均线、基准方波频率/相位同步线。②各个模块之间地位一致，可以实现真正的分布式冗余控制。③采用瞬时值控制方式，动态响应快，均

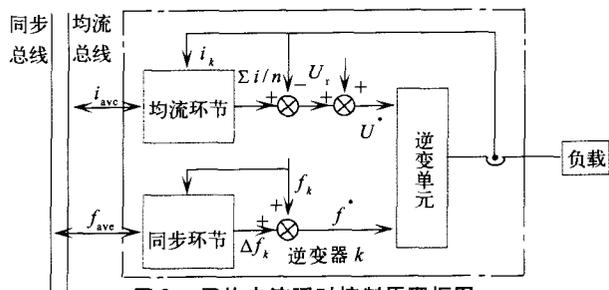


图6 平均电流瞬时控制原理框图

流特性好。④模块间的模拟通信信号较多，因此容易受到干扰，同时容易导致 EMI 问题。⑤各个模块基准电压的幅值和频率的偏差对系统控制精度和系统的稳定性影响较大。

2) 有功无功控制方案^[5]

有功无功控制方案则是通过检测本机的有功、无功信息，通过有功、无功并联线与其他模块通信，通过与其他模块有功、无功功率比较，对本模块的输出电压的频率、幅值进行调节，实现逆变器的并联，图7是基于有功无功控制方案的原理框图。

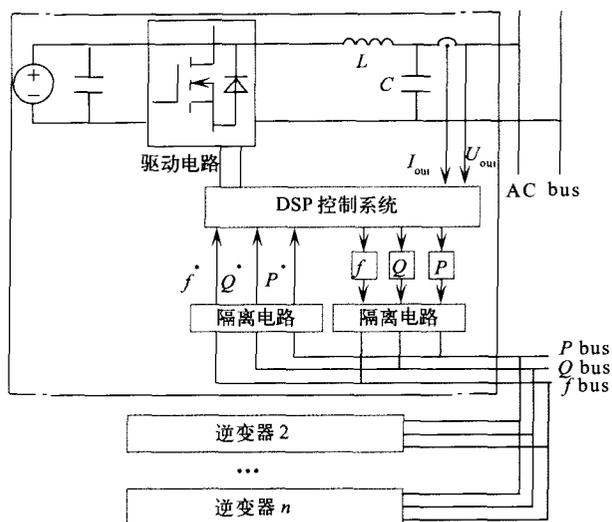


图7 有功无功控制原理框图

该方案的特点如下：①采用三条并联控制信号线：有功功率线、无功功率线和频率线。②各个模块之间地位一致，可以实现真正的分布式冗余控制。③并联控制线属于直流信号，抗干扰能力较强。④属于平均值控制方式，动态响应较差。⑤有功、无功的计算量大。

(4) 3C 控制并联方案 (Circular Chain Control)^[6]

3C 控制方法是采用跟踪的思想，将第一台逆变器的输出电流反馈信号加到第二台逆变器的控制回

路中，第二台的输出电流反馈信号加到第三台，依次连接，最后一台的输出电流反馈信号返回到第一台逆变器的控制回路，使并联系统在信号上形成一个环形结构，在功率输出方面形成并联关系。图8为两个模块并联控制框图。

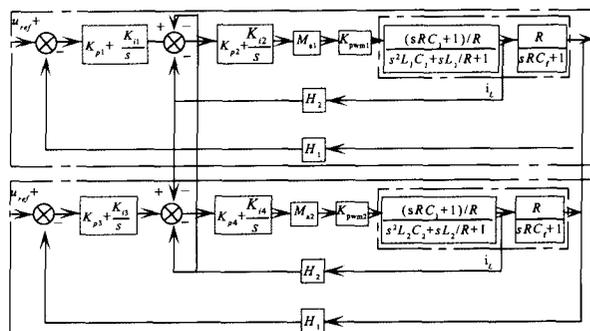


图8 3C 控制两台并联系统框图

3C 控制并联方案是分布式控制方法的改进。虽然其环形信号通路中每一模块仅接收上一模块的电流信号，但此信号中已包含其他模块的信息。因此，3C 方案的互联线大大减少，既减小了干扰，又非常容易实现多台并联。但是控制器的设计相当复杂，常规控制方案无法实现系统的可靠运行。为了保证系统的稳定性和动态性能，文献[6]提出了 H_∞ 理论控制方法。

(5) 无线并联控制方案 (Wireless Independent Control)^[7]

近年来，无互联线并联控制成为逆变器并联的研究热点。无线并联方案是从有功无功并联方案发展而来，借助电机电网中下垂特性的思想，通过预先设计的权值控制，使逆变器的输出电压的频率和幅值分别随着输出有功功率和无功功率的增加而下降，从而使逆变器的输出电压和频率稳定在一个新的平衡点。图9是无线并联控制的原理框图。

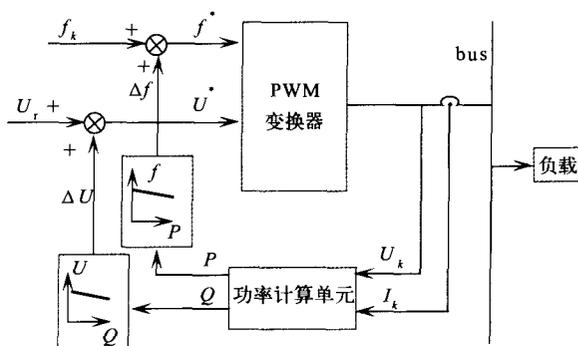


图9 无线并联方案结构框图

基于下垂特性的无线并联方案的特点：①所有并联逆变器除了输出功率线外，没有别的电气连接，实现了真正的无线并联。②基于下垂特性的无线并联方案是在输出电压频率、幅值与有功、无功均分的一个折中，因此输出特性软化。③由于有功、无功的计算一般在一个工频周期内计算得出，因此大大限制了动态响应。④系统参数对均流效果影响很大，使参数的选择极为困难。

(6) 无线并联方案的最新发展

传统的基于下垂特性的无线并联方案是在输出电压调节和功率均分之间取折中，而且，有功功率变化还可能导致逆变器输出频率的漂移，因此，如何实现真正的无线并联，同时又克服无线并联内在的缺陷成为研究的核心所在。文献[8]提出了利用逆变器的输出交流功率线作为通信载体的电力线载波通信方式实现逆变器之间的信息交换。每台逆变器都将自身的有功和无功功率通过高频调制成高频数字信号耦合到功率输出母线上，这样，每台逆变器都能了解其他模块的输出功率，从而调节自身的输出电压和频率，如图 10 所示。

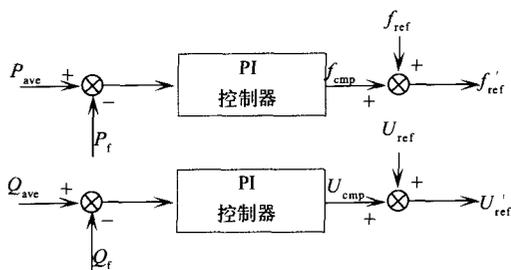


图 10 有功调频和无功调压控制框图

普通的电力线载波通信是将单台逆变器自身的信息通过高频调制的方式耦合到输出电力线上，这使滤波器参数的选择非常困难。文献[9]针对电力线载波通信的高频干扰产生的误码问题采取了新的通信策略。这种策略将单台逆变器的自身信息，包括并联模块的台数以及同步信号等，通过频率调制的方式转变成 500Hz 附近的抖频共模电流信号。各并联模块将功率输出端的共模输出电流与自身的共模给定信号比较，从而得到其他模块的信息。

共模电流频率调制法将同步信号和逆变器其他信息调制成 500Hz 附近的模拟信号，从而避免了开关频率对输出信号的干扰，也避免了输出差模滤波器对信号的衰减。

上述两种无线并联方案在一定程度上克服了传统

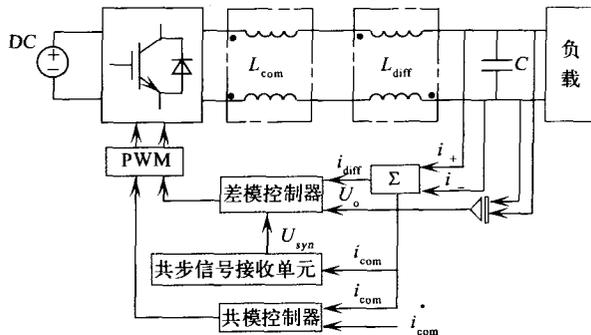


图 11 共模电流并联方案中单台逆变器的同步机制

无线并联的输出电压稳态误差大和瞬态响应慢的缺陷。但其本质上仍需依赖于各模块间的信息交换而非基于自身信息的完全自治系统。信息交换必然导致系统可靠性的降低：电力线载波通信方式受逆变器开关管高频干扰的可能性很大，因此，存在一定误码是难免的。共模电流频率调制法由于调制输出的信号为中频模拟信号，因而信息的互换对逆变器主电路输出阻抗参数的依赖性很大。例如，若逆变器输出共模阻抗不一致，将会使单台逆变器对并联模块的台数做出错误的估计，从而影响同步和均流精度。

从并联技术的发展来看，不同厂商、不同类型的 UPS 具有相同的接口形式、一致的结构设计以及相互兼容的系统可配置能力是 UPS 产品发展的必然趋势，这必然导致了 UPS 结构的模块化设计。

先进的电池管理技术

蓄电池是 UPS 在电网断电或供电不正常时保证负载可靠工作的最后一道防线，电池的可靠工作直接影响着 UPS 系统的可靠性。目前在 UPS 中普遍使用的是阀控铅酸蓄电池 VRLA，通常占整个电源系统成本的 30%~50%。阀控铅酸蓄电池采用阴极吸收技术，电池密闭封装，运行中无需进行传统的电解液控制维护，因而得到广泛应用。然而，电池密封在使用方便的同时，却使观测和维护更加困难，“免维护”又导致用户放松了电池的日常维护管理，在实际应用中暴露了越来越多的问题。不合理的工作条件导致电池的使用寿命缩短，更为严重的是由于缺乏有效的监测维护手段，不能及时、准确地掌握电池状态，无法消除电池问题带来的隐患。

(1) 电池失效机理与诱导因素^[10]

电池失效主要由以下原因造成：① 电池失水

VRLA 失水会导致电解液比重增高、电池正极栅板腐蚀，使电池的活性物质减少，从而造成电池容量降低而失效。② 负极板硫酸化 电池负极栅板的主要活性物质是海绵状铅，当 VRLA 的荷电不足时，在电池的正负极栅板上就会有 $PbSO_4$ 存在， $PbSO_4$ 长期存在会失去活性，不能再参与化学反应。这一现象称为活性物质的硫酸盐化。③ 正极板腐蚀 由于电池失水，造成电解液比重增高，过强的电解液酸性加剧正极板腐蚀。④ 热失控 热失控是指蓄电池在恒压充电时，充电电流和电池温度发生一种累积性的增强作用，并逐步损坏蓄电池。热失控的直接后果是蓄电池的外壳鼓包、漏气，电池容量下降，电池失效。

不合理的电池使用和管理方法会促使上述因素的发生从而严重缩短电池的使用寿命。深度放电会导致栅格腐蚀和活性物质损失。文献[11]介绍了放电次数、放电深度与电池寿命的关系，如图 12 所示。

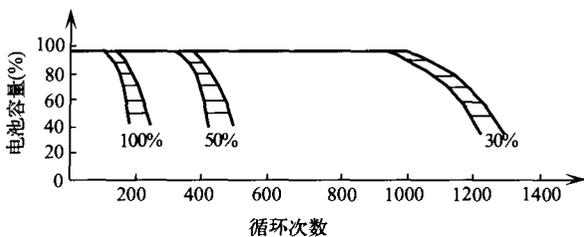


图 12 循环寿命与放电深度的关系

电池环境温度与浮充电压是影响电池寿命的另一重要因素。一直以来，浮充被普遍用来作为保持电池容量的方法。文献[12]介绍了浮充电压与环境温度之间的关系以及浮充时间与电池寿命的关系。如图 13 和图 14 所示，在 30~60℃ 之间，浮充电压增加 0.1V 将会使电池寿命缩短一半；浮充电压与工作温度需要综合考虑：电池工作温度升高应降低浮充电压，防止过充，反之亦然。连续浮充与半数时间浮充相比同样会缩短电池寿命一半以上。因此，用连续长时间的浮充来保持电池容量的方法并不可取。

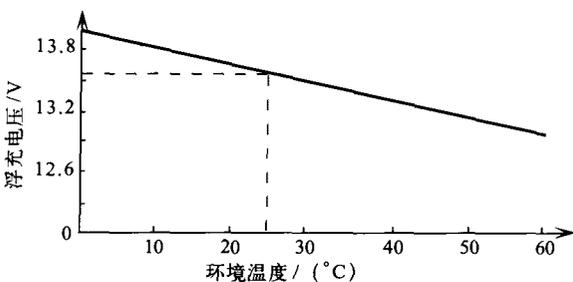


图 13 浮充电压与电池温度的关系

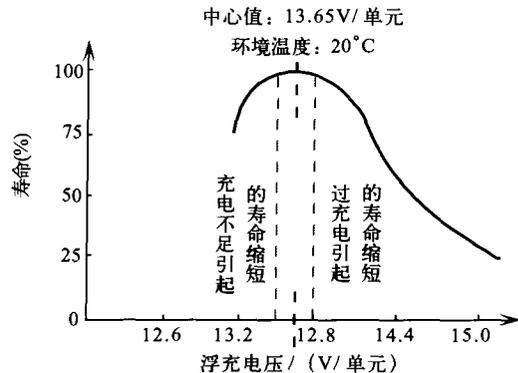


图 14 浮充电压与电池使用寿命的关系

(2) 电池监测技术及其发展

离线放电测量电池容量和电导率变化监测是较早提出的电池失效检测方法^[13]。电池的电导率正比于传输电流的横截面积，活性物质的脱落、极板板栅和汇流排的硫酸盐化和腐蚀、干涸都会导致有效的横截面积的降低，因而通过监测电池单体的电导率变化可有效地识别恶化的电池单体。但是单纯检测电池电导率变化并不能完全准确地判断电池的容量变化、健康状况、剩余电量和充电状态。针对此问题，许多文献进行了类似的研究^[14, 15]。电池的多数参数之间有着一定的耦合关系，而联合判断电池的电导率、放电电荷量以及空载电压是一种更为简便有效的判断电池状态的方案。文献[16]提出了基于库仑定量的电池荷电状态 (SOC) 监测方案和基于放电电压与充电尾电流的电池容量评估策略。

大电流快速充电和过压浮充导致的热失控是电池失效的主要原因之一。电池电导率将会随着温度的升高与降低而减小或增大，因此通过监测电池电导率和充电电流可有效监测和预防热失控的发生^[17]。

(3) 多级与均衡充电技术

文献[18]提出了一种多级快速充电算法，包括主动充电、主动放电、被动休眠三个阶段。主动充电模式以最大电流对电池充电。当电池电压达到某一阈值，进入主动放电模式，充电器降低充电电压，使极板发生去极化效应。被动休眠模式通过一定电压的浮充使电解液中的离子与极板间的距离保持在合适的距离，如图 15 所示。

由于参数的离散性和重复的充放电，电池组中的每个电池单体的容量、电压和内阻都不相同。单一地将电池组看作一个整体进行充电必然导致某些电池单体的过充电和热失控。针对此问题，文献[10]提

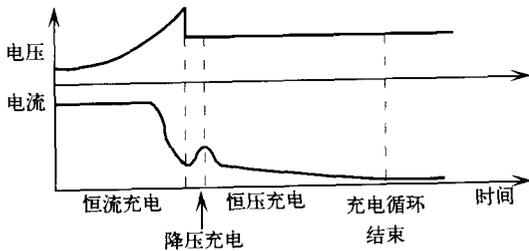


图 15 多级快速充电阶段示意图

出了对每一个电池单体都附加一个变换器，当某一电池电压超过充电阈值时，相对的变换器工作，使充电电流绕过此电池，防止过充电，如图 16 所示。

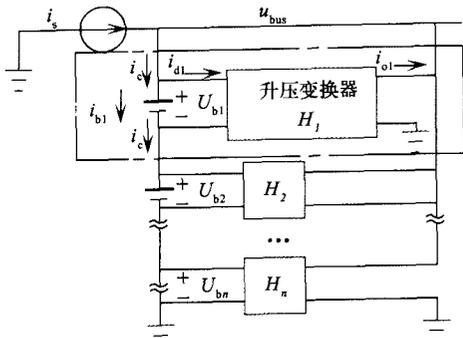


图 16 独立变换器串联电池组均衡充电示意图

针对独立变换器成本过高和结构复杂的问题，文献[19]提出了基于同轴多绕组变压器的串联电池组均衡充电的控制方式，如图 17 所示。变压器漏感在这里起着重要的作用：当某一电池单体电压偏高，则对应的二次侧绕组的电流由于漏感的限流作用上升速率变缓，反之亦然。这样，电压过高的电池单体充电电流就会减小，从而有效地防止了电池过充电的损害。

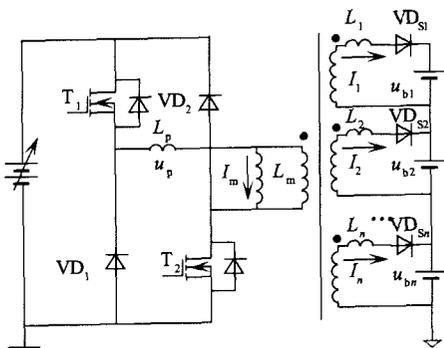


图 17 基于同轴多绕组变压器的串联电池组均衡充电

UPS 电源并联与电池管理技术的发展趋势

从以上对 UPS 系统的两大核心——逆变器与电

池的发展分析可见，提高电源系统的可靠性，实现电源的智能化监测与管理是 UPS 技术发展的必然趋势。目前世界上有许多国家的电源公司在 UPS 逆变器的并联冗余和电池监测与管理技术方面做了大量的工作，并有一系列产品投入了实用。目前，这些品牌的 UPS 系统并联控制技术的特点及发展表现在以下几个方面：

(1) 可并联的单元数增多，以多种途径实现高可靠并联运行。目前的最大并联单元数一般不超过 10 个，因而并联单元数的增多是今后的发展趋势，而并联系统控制方式呈现多样化。

(2) 可并联逆变电源实现模块化和标准化结构。模块化和标准化不仅是组成并联冗余系统以提高系统的可靠性和可维护性的要求，同时也是系统容量扩充和通用性的必要前提。

(3) 数模混合与全数字化控制技术并存。传统的纯模拟控制方式已不能满足发展的需要，为提高系统的性能和完成并联的复杂算法和逻辑控制，UPS 的控制必须单片机或 DSP 的参与。

(4) 实现无线并联的实用化，同时提高无线并联技术的可靠性、稳态精度和动态响应速度。无线并联技术能够使逆变器的并联运行不受地域的限制，降低故障的发生率，因此必然成为今后并联技术研究的重中之重。

针对电池管理方面，由于电池参数的复杂性与多样性，采取的监测与管理的措施也是多样化的。但总结起来都有以下的共同特点和发展趋势：

(1) 通过监测电池的各项参数，确保电池可靠运行。电池的成本占 UPS 总体价格的很大比重，延长电池寿命是节约 UPS 成本的有效措施。

(2) 增加电池组的容错能力。电池故障会直接导致 UPS 系统瘫痪，从而使不间断供电成为泡影。如何提前预测电池的失效以及自动将失效的电池退出电池组而实现不间断供电仍将是今后研究的热点之一。

(3) 最大化利用电池的容量。过度放电会严重损害电池而导致缩短寿命，准确估计电池的剩余电量有利于在延长电池寿命的同时充分利用电池容量，降低断电的几率。

参考文献

- [1] Jerry Thunes, Russel Kerkman et al. Current regulator instabilities on parallel voltage-source inverters [J]. IEEE Transaction on Industry Application, 1999,35(1):70-77.
- [2] Chen J F, Chu C L. Combination voltage-controlled and current-controlled PWM inverters for UPS parallel operation[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 1995,10(5): 547-558.
- [3] Xiao Sun, Yim-Shu Lee, Dehong Xu. Modeling, analysis, and implementation of parallel multi-inverter systems with instantaneous average-current-sharing scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003,18(3): 844-856.
- [4] Lee C S, Kim S, Kim C B, et al. A novel instantaneous current sharing control for parallel connected UPS[C]. IEEE INTELEC USA , 1998: 513-519.
- [5] Takao Kawabata, Shigenori Higashino. Parallel operation of voltage source inverters[J]. IEEE Transaction on Industry Application, 1988, 24 (2):281-287.
- [6] Tsai-Fu Wu, Yu-Kai Chen, Yong-Heh Huang. 3C strategy for inverters in parallel operation achieving an equal current distribution[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000,47(2): 273-281.
- [7] Tuladhar A, Jin H, Unger T, et al. Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections[C]. IEEE APEC, USA, 1997, 1 : 94-100.
- [8] 段善旭,陈坚,冯锋,等.基于电力线通信的并联UPS逆变器的均流控制[J].电力系统自动化,2003,27(24):28-31.
- [9] Yeong Jia Cheng, Eng Kian Kenneth Sng.A novel communication strategy for decentralized control of paralleled multi-inverter systems[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2006,21(1):148-156.
- [10] Hung S T, Hopkins D C, Mosling C R. Extension of battery life via charge equalization control[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 1993, 40(1):96-104.
- [11] Deshpande S, Shaffer D, Szymborski J, et al. Intelligent monitoring system satisfies customer needs for continuous monitoring and assurance on VRLA batteries[C]. Telecommunications Energy Conference, 1999, INTELEC '99.
- [12] Misra S S, Williamson A J. On temperature compensation for lead acid batteries in float service: its impact on performance and life [C]. Telecommunications Energy Conference, INTELEC '96, 18th International:25-32.
- [13] Feder D O, Hlavac M J. Analysis and interpretation of conductance measurements used to assess the state-of-health of valve regulated lead acid batteries[C]. Telecommunications Energy Conference, 1994,INTELEC'94,16th International:282-291.
- [14] Cox D C, Perez-Kite R. Battery state of health monitoring, combining conductance technology with other measurement parameters for real-time battery performance analysis[C]. Telecommunications Energy Conference,2000,INTELEC,Twenty-second International, 10-14 Sept, 2000:342-347.
- [15] Hlavac M J,Feder D .VRLA battery monitoring using conductance technology[C]. Telecommunications Energy Conference, INTELEC'95, 17th International,1995:284-291.
- [16] Kutluay K, Cadirci Y, Ozkazanc Y S, et al. A new online state-of-charge estimation and monitoring system for sealed lead-acid batteries in Telecommunication power supplies. Industrial Electronics[J]. IEEE Transactions on, 2005,52(5):1315-1327.
- [17] Morling M A. Enhanced continuous battery monitoring[C]. Telecommunications Energy Conference,2002,INTELEC,24th Annual International, 29 Sept~3 Oct 2002:574-577.
- [18] Y Podrazhansky, P W Popp. Rapid battery charger, discharger and conditioner.US Patent 4829225, May 9, 1989.
- [19] Kutkut N H, Divan D M, Novotny D W. Charge equalization for series connected battery strings[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1995,31(3):562- 568.