

逆变电源技术及其发展概况

Introduction and Developing Trend of Inverting Power Supply Technique

孙进 侯振义 空军工程大学电讯工程学院 (西安 710077)

Sun Jin Hou Zhenyi Telecommunication Engineering Institute, AFEU (710077)

卢家林 西安爱科电子有限责任公司 (西安 710119)

Lu Jialin Xi'an Aike Electronics Co., Ltd. (710119)

摘要:本文首先介绍了逆变电源技术的基本概念和衡量逆变电源的性能指标,接着对逆变电源的各种实时反馈控制技术进行了分析对比,最后介绍了逆变电源的发展趋势。

叙词:逆变电源 反馈控制

Abstract: The basic concept technique and the standard to evaluate the performance of inverting power supply are introduced in this paper. The differences among all kinds of real time feedback control technique of inverting power supply are analyzed. In the end, the developing trend of such power supply is also presented.

Keywords: inverting power supply feedback control

[中图分类号] TM464 [文献标识码] A 文章编号:1561-0349(2006)08-0027-04

1 引言

逆变电源技术是电力电子技术的重要组成部分^[1]。逆变电源是一种采用开关方式的电能变换装置,它从交流或直流输入获得稳压、稳频的交流输出。图1所示为典型的交流输入、交流输出隔离型逆变电源的基本结构。从图1可以看出,逆变电源中的能量转换过程是:输入的工频交流电经过整流电路成为直流电,直流电通过逆变电路变为交流 PWM 波电压,其基波频率是逆变电源的输出频率, PWM 波电压经输出变压器隔离,再由 LC 滤波器滤成正弦波。这一能量转换、传递的过程通常表示为 AC-DC-AC。直流输入、输出隔离型的逆变电源结构与图1基本相同,只是不需要输入端的整流电路,能量转换传递的过程可表示为 DC-AC。在逆变电源中,逆变器及其控制是逆变电源的核心。衡量逆变电源性能高低的主要指标是输出电压的品质,输出电压品质由以下特性来衡量:

(1)稳压特性:指稳态时输出电压有效值的稳定度。一般用电压稳定度来衡量。

(2)稳频特性:指稳态时输出电压频率的稳定度。一般用频率稳定度来衡量。

(3)波形特性:指稳态时输出电压波形的特性。一般用以下四项指标评价:

- 总谐波含量:除基波分量外各次谐波的方均根电压值与基波电压有效值之比;

- 单次谐波含量:某一次谐波电压有效值与基波电压有效值之比;

- 波峰系数:电压峰值与有效值之比;

- 偏离系数:波形对基波相应点的偏离值与基波峰值之比。

(4)动态特性:当负载突变或输入电压突变时,输出电压波动越小,调整时间越短,说明逆变电源的动态特性越好。

(5)电压调制特性:指输出电压幅度的波动特性。用电压调

制量的大小来衡量。电压调制量是指稳态输出电压峰值包络线的最高电压与最低电压之差。

逆变电源之所以能得到广泛应用,是因为它能实现以下功能:

- (1) 逆变电源能将直流电转换为交流电;
- (2) 变频, 逆变电源能将市电转换为用户所需频率的交流电;
- (3) 变相, 逆变电源能将单相交流电转换为三相交流电, 也能将三相交流电转换为单相交流电。

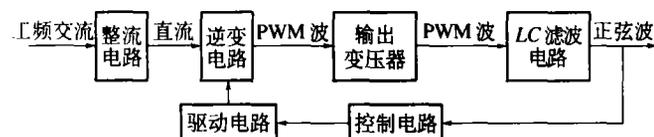


图1 逆变电源基本结构

2 逆变电源技术发展概况^[2~8]

逆变电源出现于电力电子技术飞速发展的 20 世纪 60 年代, 逆变电源的发展是和电力电子器件的发展联系在一起的, 器件的发展带动着逆变电源的发展。最初的逆变电源采用晶闸管 (SCR) 作为逆变器的开关器件, 称为可控硅逆变电源。由于 SCR 是一种没有自关断能力的器件, 因此必须通过增加换流电路来强迫关断 SCR, SCR 的换流电路限制了逆变电源的进一步发展。随着半导体技术和变流技术的发展, 自关断的电力电子器件脱颖而出, 相继出现了电力晶体管 (GTR)、可关断晶闸管 (GTO)、功率场效应晶体管 (MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 等等。自关断器件在逆变器中的应用大大提高了逆变电源的性能。由于自关断器件的使用, 使得开关频率得以提高, 从而逆变桥输出电压中低次谐波的频率比较高, 使输出滤波器的尺寸得以减小, 而且对非线性负载的适应性得以提高。最初, 对于采用全控型器件的逆变电源在控制上普遍采用带输出电压有效值或平均值反馈的 PWM 控制技术, 其输出电压的稳定是通过输出电压有效值或平均值反馈控制的方法实现的。采用输出电压有效值或平均值反馈控制的方法具有结构简单、容易实现的优点, 但存在以下缺点:

- (1) 对非线性负载的适应性不强;
- (2) 死区时间的存在将使 PWM 波中含有不易滤掉的低次谐波, 使输出电压出现波形畸变;
- (3) 动态特性不好, 负载突变时输出电压调整时间长。

为了克服单一电压有效值或平均值反馈控制方法的不足, 实时反馈控制技术获得应用, 它是近十年来发展起来的新型电源控制技术, 目前仍在不断地完善和发展之中, 实时反馈控制技

术的采用使逆变电源的性能有了质的飞跃。实时反馈控制技术多种多样, 主要有以下几种。

2.1 谐波补偿控制

当逆变电源的负载为整流负载时, 由于负载电流中含有大量谐波, 谐波电流在逆变电源内阻上的压降致使逆变电源输出电压波形畸变, 谐波补偿控制可以较好地解决这一问题, 尤其是在逆变桥输出 PWM 波中加入特定的谐波, 可抵消负载电流中的谐波对输出电压波形的影响, 减小输出电压的波形畸变。目前这种方法只能由高速的数字信号处理器来实现。

2.2 无差拍控制

1959 年, Kalman 首次提出了状态变量的无差拍控制理论。1985 年, Gokhale 在 PESC 年会上提出将无差拍控制应用于逆变器控制, 逆变器的无差拍控制才引起了广泛的重视。无差拍控制是一种基于微机实现的控制方法。这种控制方法根据逆变电源系统的状态方程和输出反馈信号来推算下一个采样周期的开关时间, 使输出电压在每个采样点上与给定信号相等。无差拍控制的缺点是算法比较复杂, 实现起来不太容易, 它对系统模型的准确性要求较高, 对负载大小的变化及负载的性质变化比较敏感, 当负载大小变化及负载的性质变化时不易获得理想的正弦波输出。

2.3 重复控制

为了消除非线性负载对逆变器输出的影响, 在 UPS 逆变器控制中引入了重复控制技术。Haneyoshi 及 Kawamura 等人首先在 PWM 逆变器中采用重复控制消除周期性畸变。后来, 邹应屿等人进一步完善了逆变器的重复控制理论, 给出了一种重复控制器的设计方法, 提出了自适应重复控制的理论。重复控制是一种基于内模原理的控制方法, 它将一个基波周期的偏差存储起来, 用于下一个基波周期的控制, 经过几个基波周期的重复可达到很高的控制精度^[7,8]。在这种控制方法中, 加到控制对象的输入信号除偏差信号外, 还叠加了一个“过去的控制偏差”, 这个“过去的控制偏差”是上一个基波周期中的控制偏差, 把上一个基波周期的偏差反映到现在, 和“现在的偏差”一起加到控制对象进行控制, 这种控制方式, 偏差好像在被重复使用, 所以称为重复控制。它的突出特点是稳态特性好、控制鲁棒性强。但重复控制的控制实时性差、动态响应速度慢。因此, 重复控制一般都不单独用于完成逆变器的控制, 而是与其他控制方式相结合共同来提高整个系统的性能。

2.4 滑模变结构控制

滑模变结构控制理论起于 20 世纪 50 年代, 它最显著的特点是对参数变动和外部扰动不敏感, 因此非常适用于闭环反馈控制的电能变换器。早期的滑模变结构控制器采用模

拟电路实现,广泛应用于电力拖动系统中。20世纪90年代中后期,台湾的邹应屿和香港大学的L. K. Wang等人将离散滑模变结构控制理论应用到UPS逆变器中,获得了良好的控制效果。滑模变结构控制实质上是一种非连续的开关控制方法,它强迫系统的跟踪误差及其导数运行于相平面的一条固定的滑模曲线上,与系统参数变动及外部扰动无关,因此系统有极强的鲁棒性。但是,就波形跟踪质量来说,滑模控制不如重复控制和无差拍控制。

2.5 单一的电压瞬时值反馈控制

这种控制方法的基本思想是把输出电压的瞬时反馈值与给定正弦波进行比较,用瞬时偏差作为控制量,对逆变桥输出PWM波进行动态调节。和传统PWM控制方法相比,由于该方法能对PWM波进行动态调整,故系统的快速性、抗扰性、对非线性负载的适应性、输出电压的波形品质等都比传统PWM控制方法有所提高。这种方法的缺点是系统的稳定性不好,特别是空载时,输出电压容易振荡。系统的稳定性问题限制了电压调节器增益的提高,因而输出电压的波形品质还不是很好。

2.6 带电流内环的电压瞬时值反馈控制

带电流内环的电压瞬时值反馈控制方法是在单一的电压瞬时值反馈控制方法的基础上发展起来的。在这种方法中,不但引入输出电压的瞬时值反馈,还引入滤波电容电流或滤波电感电流的瞬时值反馈,电压环是外环,电流环是内环。电流环具有将滤波电容电流或滤波电感电流改造为可控的电流源的作用,这样,控制输入和输出电压之间就形成了具有单极点的传递函

数,因而系统的稳定性大大提高,克服了单一的电压瞬时值反馈控制系统空载容易振荡的缺点。由于稳定性的提高使得电压调节器增益可以取比较大的值,所以突加负载或突卸负载时输出电压的动态特性大大提高,抗扰性能大大提高,对非线性负载的适应性也大大提高。

3 逆变电源的发展趋势^[9~12]

随着电力电子技术的飞速发展和各行各业对逆变器控制性能要求的提高,逆变电源也得到了深入的发展,目前,逆变电源的发展趋势主要集中在以下几个方面。

1. 高频化

提高逆变电源的开关频率,可以有效地减小装置的体积和重量,并可消除变压器和电感的音频噪声,同时改善了输出电压的动态响应能力。此外,为了进一步减小装置的体积和重量,必须去掉笨重的工频隔离变压器,采用高频隔离。高频隔离可以采用两种方式实现:

(1)在整流器与逆变器之间加一级高频隔离的DC-DC变换器;

(2)采用高频链逆变技术。

两种高频隔离方式如图2所示。高频化仅限于小容量逆变电源。在大容量逆变电源中,由于工频变压器引起的矛盾相对不如小容量UPS突出,而且大容量的高频逆变器、整流器和高频变压器的制作也分别受到高频开关器件的容量和高频磁性材料的限制。

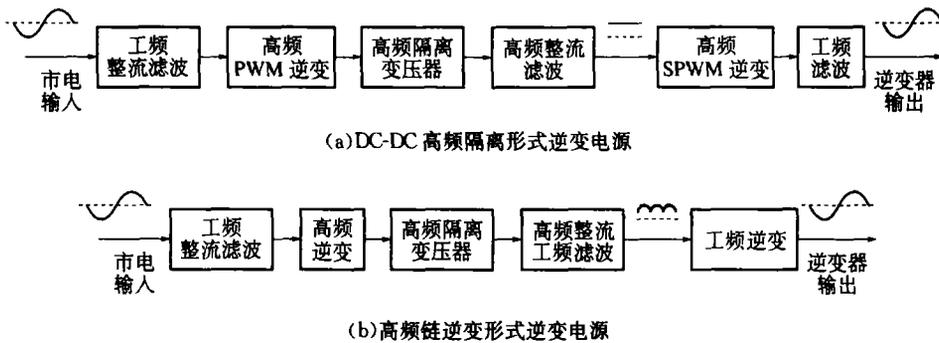


图2 高频隔离逆变电源结构框图

2. 高性能化

高性能主要指输出电压特性的高性能,它主要体现在以下几个方面:①稳压性能好,空载及负载时输出电压有效值要稳定;②波形质量高。不但要求空载时的波形好,带载时波形也要好,对非线性负载的适应性要强;③突加或突减负载时输出电压的瞬态响应特性好;④电压调制量小;⑤输出电压的频率稳定性好;⑥对于三相电源,带不平衡负载时相电压失衡小。输出电压的高性能是用电设备对逆变电源的要求,控制方式的改进是逆

变电源实现高性能的主要手段。

3. 并联及模块化

当今逆变电源的发展趋向是大功率化和高可靠性。虽然现在已经能生产几千kV·A的大型逆变电源,完全可以满足大功率要求的场合。但是,这样整个系统的可靠性完全由单台电源决定,无论如何可靠性也不可能达到很高。为了提高系统的可靠性,就必须实现模块化,模块化意味着用户可以方便地将小容量的模块化电源任意组合,构成一个较大容量的逆变电源。模

块化需要解决逆变电源之间的并联问题,逆变电源的并联要比直流电源的并联复杂,它面临着负荷分配、环流补偿、通断控制等多方面的问题。但是,逆变电源的并联运行可以带来以下几个方面的益处:①可以用来灵活地扩大电源系统的容量;②可以组成并联冗余系统以提高运行的可靠性;③具有极高的系统可维修性。当单台电源出现故障时,可以很方便地通过热插拔方式进行更换和维修。

4. 小型化

在逆变电源中,决定整个装置体积和重量的部分是变压器和LC滤波器,变压器可能放在输入部分,也可能放在输出部分,起电压隔离或电压匹配的作用;LC滤波器用于滤除PWM波中的高次谐波,滤波器的尺寸与PWM波的频谱特性有关。要使逆变电源小型化,可以采用的方法有三种:①提高开关频率,使滤波器小型化;②采用新的PWM控制方式,优化逆变桥输出PWM波的频谱,使滤波器小型化;③用高频变压器实现电压的隔离及匹配,替代输入或输出的低频变压器,实现变压器的小型化。

5. 高输入功率因数化

对于交流输入的逆变电源,中间环节直流电源一般由二极管整流获得,其输入电流呈尖脉冲状,因此,输入功率因数不高。提高整流侧的输入功率因数不仅可大大提高逆变电源对输入电能的利用率,而且可以克服逆变电源对电网产生谐波污染的缺点。

6. 数字化

逆变电源的数字化并不是简单的指在系统中应用了数字器件,如单片机及FPGA等,而是指整个系统的控制应用数字器件的计算能力和离散控制方法来完成,随着硬件技术的发展,处理器计算速度的提高,必然促使逆变电源向数字化方向发展。

7. 智能化

一个智能化的逆变电源除了能够完成普通逆变电源的所有功能外,还应具有以下功能:①对运行中的逆变电源进行监测,随时将采样点的状态信息送入计算机进行处理,一方面获取电源工作时的有关参数,另一方面监视电路中各部分的状态,从中分析电路的各部分工作是否正常;②在逆变电源发生故障时,根据监测的结果进行故障诊断,指出故障的部位,给出处理方法;③自动显示所监测的参数,有异常或发生故障时,可以自动记录有关异常或故障的信息;④按照技术说明书给出的指标,自动定期地进行自检,并形成自检记录文件;⑤能够用程序控制逆变电源的启动和停止,实现无人值守的自动操作;⑥具有信息交换功能,可以随时向上位机输入信息,或从上位机获取信息。

参考文献

[1] 刘凤君. 正弦波逆变器. 北京:科学出版社,2002.

- [2] 卢加林. IGBT应用共性技术和大容量高性能逆变电源的研究. 西安交通大学博士学位论文,2000.
- [3] P. Mattavelli, Synchronou-Frame Harmonic Control for High-Performance AC Power Supplies. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(3), 864—872.
- [4] Jae-Young Jang, Kyo-Beum Lee, Joong-Ho Song, Ick Choy. Disturbance Observer-based Digital Control for Single-Phase UPS Inverters. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2001, 1095—1099.
- [5] Zhang Kai, Kang Yong, Xiong Jian, Chen Jian. Deadbeat Control of PWM Inverter with Repetitive Disturbance Prediction. IEEE-APEC99, 1999, 1026—1031.
- [6] K. Zhou, D. Wang, K. S. Low. Periodic Errors Elimination in CVCF PWM DC-AC Converter System; Repetitive Control Approach. IEE Proc. -Control Theory Appl. 2000, 147(6), 694—700.
- [7] Marian P. Kazmierkowski, Luigi Malesani. Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converter; A Survey. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(5), 691—703.
- [8] S. Buso. Uninterruptible Power Supply Multiloop Control Employing Digital Predictive Voltage and Current Regulators. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(6), 1846—1854.
- [9] H. Pinheiro, P. Jain. Comparison of UPS topologies based on high frequency transformers for powering the emerging hybrid fiber-coaxial networks. IEEE INTELEC'99, 1999, 9—12.
- [10] Y. B. Byun. Parallel Operation of Three-Phase UPS Inverters by Wireless Load Sharing Control. INTELEC'2000, 526—532.
- [11] Yu Meng, Shanxu Duan, Yong Kang, Jian Chen. Research on Voltage Source Inverters with Wireless Parallel Operation. IEEE IPEMC'2000, 808—812.
- [12] 王其英,何春华. UPS不间断电源剖析与应用. 北京:科学出版社,1996.

作者简介

孙进,女,1968年生,空军工程大学电讯工程学院讲师,博士,主要研究方向为高性能逆变电源的控制技术。

收稿日期:2005—08—21

定稿日期:2006—06—10