

## A Method of Detecting and Suppressing Inverter DC Bias\*

WANG Bo\*

(School of Traction Power, Xi'an Railway Vocational & Technical Institute, Xi'an 710026, China)

**Abstract:** In order to eliminate the DC bias voltage of the inverter AC output, a detection circuit and a suppression method are proposed. The detection circuit is composed of low-pass filter, isolation follower, and amplification circuit. It can accurately extract the DC bias voltage, and also it has a certain ability to resist common mode disturbance. The obtained DC bias voltage is adjusted by the control system, and the calculated DC bias feedback is added to the fundamental wave, and then the DC bias is adjusted by a double closed-loop system of voltage and current. Through the 10kVA inverter experimental platform, the detection circuit and suppression method are verified, and the experimental effect is significantly better than the commonly used detection circuits and suppression measures, and it can obtain the ideal suppression effect under strong electromagnetic interference. The experimental results show that the proposed DC bias detection circuit and suppression method are feasible.

**Key words:** inverter; DC bias; detection circuit; suppression method; common-mode interference

EEACC: 7310B

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.010

## 逆变器输出直流分量检测与抑制方法\*

王博\*

(西安铁路职业技术学院牵引动力学院, 西安 710026)

**摘要:** 为消除逆变器交流输出的直流偏置电压, 提出了一种检测电路与抑制方法。该检测电路由低通滤波、隔离跟随、调理放大等硬件电路组成, 可以精准提取直流偏置电压, 并具有一定抗共模干扰的能力。所得到的直流分量, 经控制系统调整得到直流反馈量, 并叠加到基波后, 经电压与电流的双闭环系统调节直流分量。通过 10 kVA 的逆变器实验平台验证了该检测电路与抑制方法, 直流偏置电压的抑制效果明显优于常用的检测电路及抑制措施, 且能够在较强的电磁干扰下获得理想的抑制效果。实验结果表明所提出的直流分量检测电路与抑制方法可行。

**关键词:** 逆变器; 直流偏置; 检测电路; 抑制方法; 共模干扰

中图分类号: TM135

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2021)01-0052-05

在逆变器类产品的交流输出中, 由于种种原因总会含有相当成份的直流分量, 这会增大逆变器及负载的损耗, 缩短器件及导线的寿命, 使变电站内变压器因直流偏磁而使得磁芯饱和, 引发变压器着火等后果, 严重危害电网可靠性。国家标准规定非并网的逆变器类产品, 交流输出的直流分量应小于 $\pm 100$  mV。因此, 消除或抑制非并网的逆变器输出直流偏置电压是有关逆变器产品开发研究的主要课题。

一般来讲, 逆变器交流输出的直流分量产生的原因有多种: 开关管的工作特性差异导致的不对称;

驱动信号不一致导致的不对称; 传感器、运放及 A/D 转换器等检测电路误差或零漂引起的不对称<sup>[1-2]</sup>。在工程应用中, 对于逆变器交流输出直流分量的抑制分为两部分: 首先利用检测电路对交流输出的直流分量进行采集, 然后将采集到的直流偏置电压引入闭环控制系统内, 调整输出 SPWM 信号脉宽, 从而减小或消除直流偏置<sup>[3-5]</sup>。

在现有的逆变器产品中有关直流分量的抑制, 由于受直流分量的检测精度的限制, 抑制效果不理想, 尤其是逆变器系统在共模干扰较大的电路拓扑结构中, 直流分量检测电路抗干扰能力较弱, 精度更

加难以保证。另外,在控制系统中没有设置特定的直流偏置电压调节器,即使系统能够检测到偏置电压,而控制系统无法抑制偏置电压。

针对逆变器直流偏置电压检测精度、抗干扰能力、控制系统抑制方法等问题,提出了一种精准的交流电压直流分量检测电路及抑制方法,而且该电路具有良好的抗共模干扰的能力,可明显改善直流偏置电压的抑制效果及抗干扰能力,从而提升逆变器的输出性能。

## 1 电压直流分量检测电路

逆变器是一个进行功率变换的系统,其内部时刻都有较大的  $di/dt$ 、 $du/dt$  发生,因此它是一个电磁干扰较为复杂严重的系统。当系统中开关器件高频工作时,就会有较大的差模或共模的干扰信号产生<sup>[6-7]</sup>。传统的直流分量检测电路未考虑共模干扰发生时信号采集电路的可靠性及精度,因此直流分量检测及处理就会受到严重的影响。

为了在强电磁干扰下精确采集直流偏置电压,首先,通过低通滤波器对交流电压信号中直流偏置电压进行提取,再对直流偏置电压的信号进行阻抗匹配及隔离调理,然后,对直流偏置电压的信号进行调理及放大<sup>[8-12]</sup>。

### 1.1 低通滤波电路

图 1 所示的电路利用两组相似的低通滤波模块 I 和 II 实现直流偏置电压的提取。对于第 I 组来讲,交流电压一般较高,处于系统的一次侧,而检测端属于二次侧,除了进行低通滤波处理之外还需要进行电压衰减。对于低通滤波器截止频率的设置,主要考虑滤除工频交流 50 Hz 的信号,且不能对所采集的直流偏置电压产生衰减,根据香农采样定理相关理论,应选择小于 5 Hz 的截止频率。另外,直流偏置电压的采集在逆变器控制系统中处于最外环,调节的响应时间可以稍长些,最重要的是确保采集的精度,因此应尽量选择较低频率的滤波参数来保证精度。

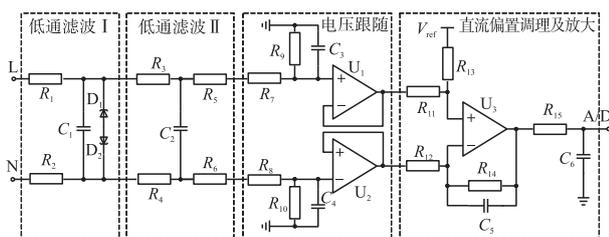


图 1 精准的直流分量采集电路

根据具体被测量,设置  $R_1$ 、 $R_2$  为 200 k $\Omega$  电阻,  $C_1$  为 2  $\mu$ F 瓷片电容组成第 I 组滤波器,其截止频

率由式(1)可计算得到为 0.2 Hz。第 II 组滤波器参数与第 I 组类似,  $R_3$ 、 $R_4$  为 200 k $\Omega$  电阻,  $C_2$  为 2  $\mu$ F 瓷片电容,截止频率为 0.2 Hz。

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (1)$$

$D_1$ 、 $D_2$  为齐纳二极管,主要作用是在逆变器交流输出停电或开机瞬间还未形成交流信号,其直流分量非常大,对滤波后信号进行钳位,防止电压过高损坏后级元件。 $R_5$ 、 $R_6$  配合后级电路,对直流成份进行衰减或阻抗匹配。

### 1.2 电压跟随电路

电压跟随电路是直流分量采集电路的核心部分,也是与常规电路区别较大的部分。电路由两个集成运算放大器组成,如图 1 中  $U_1$ 、 $U_2$ ,每个独立的运算放大器连接成电压跟随器的形式,两组完全对称。众所周知,电压跟随器是一种常见的信号调理电路,它的特点是具有极高的输入阻抗与极低的输出阻抗。极高的输入阻抗是指跟随器输入与后端电路等效阻抗极高,从某种程度上讲输入侧与后端电路相当于隔离,当前端调理电路或者测试点发生异常的振荡、干扰、畸变时,后端受到的影响极小。极低的输出阻抗使得微弱的直流偏置电压信号得以放大,调理后具有一定强度,因而具有相当的抗干扰的能力。两组完全对称的差分形式的跟随器不仅可以提取正、负的直流偏置电压,而且当系统受到共模源干扰时,该检测电路可以进行有效的抑制,因此该电路具有明显的抗共模干扰的能力。

电路中  $R_7$ 、 $R_9$  与  $R_8$ 、 $R_{10}$  两组电阻网络是对进入电压跟随器的信号进行衰减及阻抗匹配,这两个电阻网络连接方式相同,  $C_3$ 、 $C_4$  可对信号进行必要的高频滤波。

### 1.3 直流偏置电压的调理放大

从高压的交流电压中经过两级的低通滤波电路与差分电压跟随电路可以提取出较为精准的直流偏置电压,该电压信号一般幅值较小,难以被控制器的 A/D 转换器精确识别,因此需要将其进行调理放大至合适的范围。

调理放大电路采用集成运算放大器连接成差分的形式,也可有效防止共模干扰,确保信号在进入 A/D 转换器前不失真。由于直流偏置电压有正向也有负向,数字控制器一般采用单向正电源供电,其 A/D 口所能识别的也是正向电压,为此,需要将有可能发生的负向偏置电压进行调理。工程上常采用控制器供电一半电压进行上拉,如图 1 中  $V_{ref}$ ,将其变换为零到满量程的所能识别的信号,图 1 中  $R_{11}$ 、

$R_{13}$ 即为  $V_{ref}$ 上拉的分压电阻。 $R_{12}$ 、 $R_{14}$ 与  $U_3$  为反馈放大电路,对直流偏置信号进行比例放大处理, $C_5$ 的作用是在比例放大的同时,对调理电路增加积分环节,从而减小误差,增强电路的采集精度。 $R_{15}$ 与  $C_6$  构成低通滤波器,对调理电路的输出信号在进入控制器的 A/D 转换器前进行低通滤波处理,消除线路中的高频噪声。

## 2 直流分量补偿策略

### 2.1 逆变器总体控制方案

逆变器的控制目标是在稳态和瞬态确保标准的正弦输出,即要求有较高的稳态精度和良好的动态性能。稳态精度参数包含总谐波畸变率 THDu、相位与幅值的静态误差;动态性能指在逆变器输入侧或负载侧等外界扰动下输出波形畸变率。为满足逆变器的稳态和动态性能,控制方法起着关键作用<sup>[13-16]</sup>。目前,逆变器控制方式可分为两类,有效值控制与瞬时值控制。有效值控制是以输出电压有效值作为反馈控制量,保证额定的输出电压有效值,但在负载突变时的动态响应很慢,在非线性负载下电压畸变很严重。瞬时值控制是以输出电压瞬时值作为反馈量,实现对输出交流电压瞬时值的调整,可以实现较快的动态响应,较低的谐波畸变<sup>[17-20]</sup>。

在本文的逆变器实验平台中,为实现最佳的输出性能,结合两种控制方法的优势,采用混合的控制方案,即周期的有效值控制来保证稳态误差,瞬时值控制来实现动态性能。直流分量的调节一般是经过若干工频周期内进行,动态响应较慢,但稳态精度要求较高,因此,直流分量控制器处于混合控制的最外环。

### 2.2 直流分量抑制策略

逆变器输出交流电压直流分量补偿的方式一般有两种:一种是采用电压霍尔传感器或其他硬件电路检测逆变输出的直流偏置电压,根据检测到的交流电压直流分量调节逆变器参考正弦波来消除逆变器输出电压中的直流分量;另一种是采用电流霍尔传感器检测滤波电感的直流电流,根据采样到的直流电流和直流电压的比例关系调节逆变器参考正弦波来消除逆变器输出电压中的直流分量<sup>[2]</sup>。

本文采用第一种方式,即由图 1 电路获得的交流输出电压的直流分量,经过控制系统的直流调节器调整得到直流电压反馈量,该直流电压反馈量叠加到正弦基准波,最后经电压、电流双闭环控制器调节控制逆变器输出电压直流分量为零。

图 2 为 10 kVA 的逆变器实验平台中逆变部分

直流分量抑制原理示意图。直流分量采集点为逆变器交流输出,然后经过高压电压衰减与低通滤波、差分式电压跟随与隔离调理、差分放大后得到直流偏置电压  $\Delta U_{DC}$ ,并将其送入直流分量控制器内进行调节。图 3 给出了逆变器部分系统多环路控制示意图,其中  $K_p$  与  $K_i$  为电流内环控制器的比例与积分系数, $K_f$  为电流环反馈系数; $K_{Vp}$  与  $K_{Vi}$  为瞬时电压外环控制器的比例与积分系数, $K_V$  为电压环反馈系数; $K_{DCp}$  与  $K_{DCi}$  为直流分量抑制环控制器的比例与积分系数, $G_{DC}$  为直流抑制环反馈增益; $K_{PWM}$  为逆变器 PWM 调节器增益; $L$  为滤波电感量, $r$  为其等效内阻, $C$  为滤波电容。

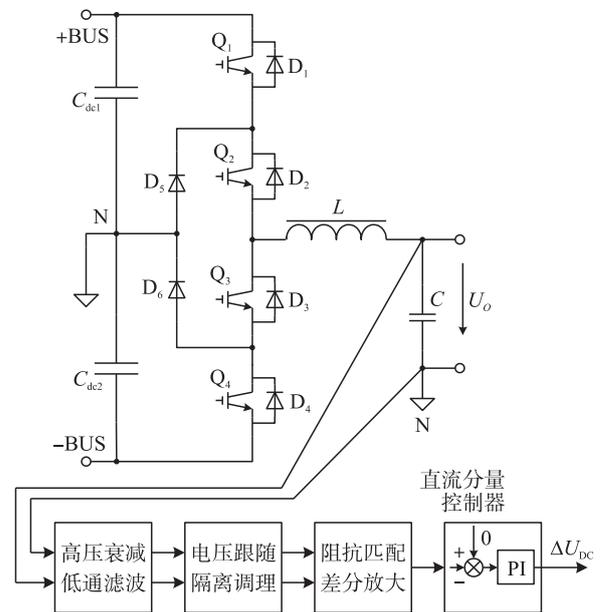


图 2 逆变器直流分量抑制原理图

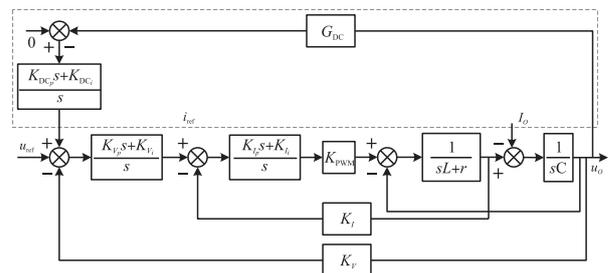


图 3 逆变器多环控制系统框图(含直流抑制环)

逆变器内层控制环为输出滤波电感电流反馈的电流环,为确保逆变器输出具有较高的动态响应及可靠的过流保护功能,采用比例、积分调节。外层控制环为瞬时电压环,为保证逆变器交流输出电压为纯正的正弦波与较低的总谐波畸变率(THDu)而采用比例、积分调节。虚线部分为直流分量抑制环,其反馈作用点位置为逆变器瞬时电压环信号给定端,为使输出交流电压直流分量满足在  $\pm 100$  mV 以内

的标准,采用比例、积分进行调节。由硬件电路采集获得的直流偏置电压  $\Delta U_{DC}$  与直流分量基准(一般为 0)进行比较产生直流分量误差量,经直流分量控制器中比例、积分环节调整。

### 3 实验验证

为了验证文章所述的精准的直流分量采集电路及直流分量抑制方法的科学性,在 10 kVA 的逆变器平台上进行相应实验。为验证直流分量采集电路的精确度及抗干扰性,采用文章所述的精准采集电路与常规采集电路两种类型分别进行测试,并将逆变器系统接地与配电安全地分为连接与断开两种情况。

实验结果如图 4、图 5 所示,从图中可以看出,文章所述的精准的直流分量采集电路与常规采集电路相比,采用相同的抑制方法,最终的直流分量要远小于常规电路,逆变器系统接地,直流分量可以控制在 20 mV 以内;不接地则可以控制在 30 mV 内,均满足国家标准。常规电路在系统接地情况下,可控制在 50 mV 内,一旦系统不接地,就会超标达 210 mV 左右,不满足国家标准。逆变器系统接地后对于内部的一些较大的  $di/dt$ 、 $du/dt$  可通过共模泄放回路导入安全大地,相应的直流偏置电压也会减小。

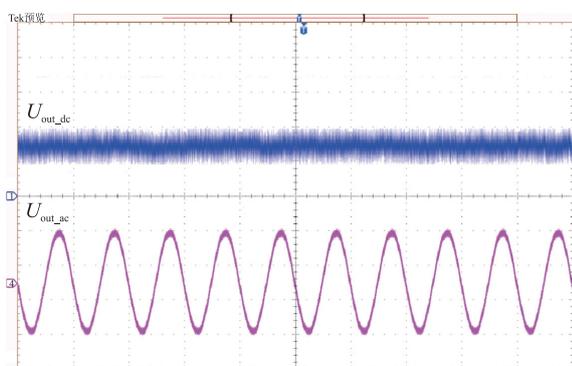


图 4 交流电压与直流偏置电压波形

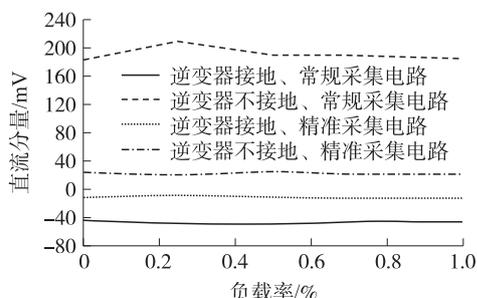


图 5 不同条件的直流偏置电压测试结果

### 4 结论

常用的逆变器交流输出直流分量检测电路采集精度较差,尤其是在强电磁干扰的逆变器系统或受

到外界共模电子干扰,其检测精度及工作稳定性无法保证。文章所述的精准的直流分量采集电路可以精确采集直流偏置电压,并将该偏置电压引入控制系统的算法中进行处理,对对称的逆变器系统进行反方向的偏置控制,从根本上消除交流信号的直流偏置,防止由于该直流偏置而引起的诸多问题。同时,该采集电路根据共模干扰源发生的机理,从根本上消除或者尽可能减小共模干扰,因此,具有一定的抗共模干扰的能力。从实验结果可以看出,文章所述的精准直流分量检测电路与常规电路相比具有明显的优势;相应的抑制方法与策略也可以达到系统要求,满足国家标准对于直流偏置电压的要求。因此,检测电路与抑制方法科学、可行。

### 参考文献:

- [1] 林渭勋. 现代电力电子电路[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2002:209-211.
- [2] 何国锋,徐德鸿. 基于解耦控制的多模块逆变器并联系统直流环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(18):43-51,176.
- [3] 何国锋. 不间断电源直流偏移抑制[J]. 电气技术,2016(4):80-83.
- [4] 王归新,彭艺. HERIC 型并网逆变器及其直流分量抑制的研究[J]. 电测与仪表,2019,56(5):32-37.
- [5] 杨亮,苏剑,刘海涛,等. 单相并网逆变器的直流分量抑制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):145-150.
- [6] 陈堃,陈昌旺,刘涤尘. 光伏并网逆变器输出电压直流分量的瞬时补偿策略[J]. 电网技术,2013,37(11):3080-3085.
- [7] 金灵辉,吕征宇. 基于 DSP 的逆变器输出电压直流分量软件调偏法[J]. 电力电子技术,2011,45(9):1-4.
- [8] 李敏,杨爱超,吴宇,等. 开口式电流互感器耐直流性能研究[J]. 电测与仪表,2019,56(13):123-128,135.
- [9] 方天治,王健,阮新波. 分布式输入串联输出并联逆变器系统的复合式控制策略[J]. 电工技术学报,2015,30(22):108-115.
- [10] 杨洋,孙静,杨培栋,等. 适用于混合仿真的戴维南等效阻抗改进求取算法[J]. 电力工程技术,2017,36(4):36-42.
- [11] 李勇,郭勇,皇甫星星,等. T 型三电平逆变器的中点平衡建模与控制[J]. 电力工程技术,2017,36(2):61-65.
- [12] 于玮,徐德鸿. 基于虚拟阻抗的不间断电源并联系统均流控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(24):32-39.
- [13] 于玮,徐德鸿,周朝阳. 并联 UPS 系统均流控制[J]. 中国电机工程学报,2008,28(21):63-67.
- [14] Shahparasti M, Yazdian A, Mohamadian M, et al. Parallel Uninterruptible Power Supplies Based on Z-Source Inverters [J]. IET Power Electronics, 2012, 5(8):1359-1366.
- [15] Hasanazadeh A, Onar O C, Mokhtari H, et al. Proportional-Resonant Controller Based Wireless Control Strategy with a Reduced Number of Sensors for Parallel-Operated UPSs [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1):468-478.
- [16] Yu Wei, Xu Dehong, Zhou Chaoyang. Parallel Control of the UPS

- Inverters[C]//Proc IEEE Applied Power Electronics Conference. Texas, America:IEEE,2008:939-944.
- [17] Marwali M N, Jung J W, Keyhani Ali. Stability Analysis of Load Sharing Control for Distributed Generation Systems [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion,2007,22(3):737-745.
- [18] Guerrero J M, Luis Garcia de Vicuna, Matas J, et al. Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters with Wireless Load-Sharing Control [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2005,52(4):1126-1135.
- [19] De Brabandere K, Bolsens B, Van den Keybus J, et al. A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters [C]//IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany:IEEE,2004:1107-1115.
- [20] Chen Liangliang, Xiao Lan, Gong Chunying, et al. Circulating Current's Characteristics Analysis and the Control Strategy of Parallel System Based on Double Close-Loop Controlled VSI [C]//Proc IEEE Power Electronics Specialists Conference, Nanjing, China: IEEE,2004:4791-4797.



王 博(1983—),男,汉族,陕西蒲城人,硕士,讲师,主要研究方向为逆变技术、DC-DC 谐振变换技术、宽禁带半导体器件应用技术,19wangbo@163.com。