

# 一种单级三相高频隔离AC/DC变换器分析

## Analysis of The Single Level 3-Phases High Frequency Isolating AC/DC Converter

叶欣 供稿

中图分类号: TN86 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517(2016)05-3-131

### 1 引言

在我国,长期以来,采煤矿井内的照明,基本上都是大量地使用127V的照明电源以及综合保护装置。并且,目前矿业部门选用的井下照明器材仍然以传统电源为主,即是将工频变压器、组合开关以及综合保护装置组合在一起,安装在一个隔离的防爆外壳中,为煤矿井下使用的设备供电。随着矿井内开采作业面的规模日益增大,巷道与综合采掘工作面的加长和扩大,井下供电的电压需要提高,所以,许多矿井使用了大容量的6kVA、8kVA乃至10kVA的电源。但这些电源大多数仍是以工频变压器为设计主体,故其体积大、质量大、效率低;在660V电压变为127V电压的过程中产生了比较严重的能量损耗。与此同时,使用电力电子变压器进行调压的技术和产品在近几年中得到了快速发展,其性能更优良,如无电网污染,输出电压稳定,功率因数可调,具有高度的可控性和可靠的电路检测保护功能,等等。因此,研究开发体积小、重量轻、高效率的电力电子变压器来取代工频变压器成为现阶段矿井照明领域的主要研究课题。

### 2 使用电力电子变压器进行交流调压分析

电力电子变压器的设计思路源于具有高频链接的AC/AC变换电路。它是一种含有电力电子变换器且通过高频变压器实现磁耦合的变换装置,它们的突出特点在于通过变换器实现对其交流侧电压幅值与相位的实时控制,可以实现变压器原、副边电压、电流及功率的灵活调节。电力电子变压器的实现方案主要分两种:一种是变换中不含直流环节的AC/AC变换;另一种是变换中含有直流环节的

AC/DC/DC/AC变换。其第二种方案的主电路结构如图1所示。从图1中我们可以看到,这种电力电子变压器主要分成三个模块:输入整流级、DC/DC变换级和输出逆变级。采用现代电力电子技术和适当的方法,对图中的开关管进行控制,该装置就可以实现与传统的工频变压器相同的功能。二者相比较,当传输功率一定时,电力电子变压器不仅体积、质量比工频变压器小很多,而且其电性能要比工频变压器好。

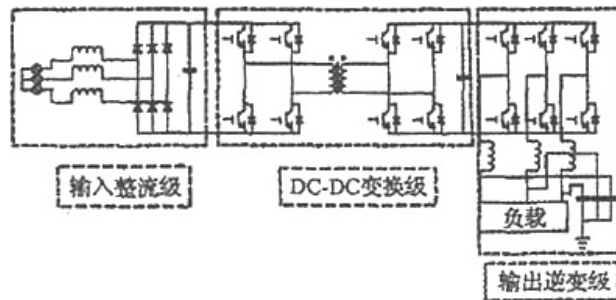


图1 电力电子变压器主电路结构图

### 3 一种AC/DC变换器分析

基于传统的整流和逆变方法的电力电子变压器有两个主要缺点:一是对于大功率、高电压的电路而言,开关管的耐压能力有限;二是整流和逆变中用了太多的开关管,降低了电路运行的稳定性,增加了能量的损耗,也提高了电路的成本。因此,针对电力电子变压器前端的AC/DC整流部分,本文提出了一种单级高频隔离的三相AC/DC变换器,并进行了理论探讨验证,证明了它们用于采煤矿井下的无工频变压器照明电源设计是可行的。其具体的结构如图2所示。该结构可以取代图1中虚线框中的输入整流级

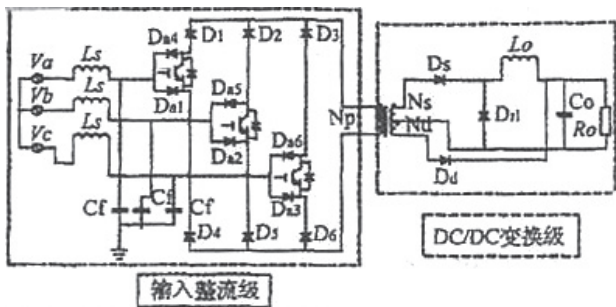


图2 单级 AC/DC 变换器拓扑结构

和 DC/DC 变换级。通过将图 1 与图 2 对比可以看出，该结构在实现 AC/DC 变换的过程中只使用了三个开关管。开关器件使用量的减少可以简化电路结构，减少电路损耗；输入端采用 PWM 的整流方法，功率因数将可以调节并且可以实现高功率因数运行；DC/DC 部分采用正反激电路设计可以稳定输出电压。

图 2 所示单级高频隔离三相 AC/DC 变换器的工作原理简介如下：在输入整流端采用 PWM 整流的方法，从而在变压器原边  $N_p$  两端产生 PWM 方波；原边的功率通过副边的  $N_s$  传递给负载， $L_o$  和  $D_d$  组成了续流回路，保证了负载电压的稳定性；变压器副边线圈  $N_d$  和二极管  $D_d$  以及负载组成的回路之作用是变压器去磁。这样就使变换器工作在负载电流连续 (CCM) 和输入电流断续 (DCM) 的模式下，可以实现上述的各种优良性能。该变换器具体的控制方法是通过采样输入电流和输出电压，进行坐标变换以及闭环调节的作用来调节输入电压与电流（功率因数）和输出电压与功率。常用的三相 PWM 整流方法见以上论述。该电路中具体的 PWM 整流方法是：先定义三个两电平调制变量  $m_a(t)$ 、 $m_b(t)$ 、 $m_c(t)$ ，再通过矩阵变换产生三电平变量  $y_a(t)$ 、 $y_b(t)$ 、 $y_d(t)$ ，通过这三个变量的状态来控制三个开关管的开通和关断。开关管的控制表见表 1 所示。

表 1 开关管控制表

状态	两电平			三电平			开关		
	$m_a$	$m_b$	$m_c$	$y_a$	$y_b$	$y_c$	$s_1$	$s_2$	$s_3$
1	+1	+1	-1	0	+1	-1		1	1
2	+1	-1	+1	+1	-1	0	1	1	
3	+1	-1	-1	+1	0	-1	1		1
4	-1	+1	+1	-1	0	+1	1		1
5	-1	+1	-1	-1	+1	0	1	1	
6	-1	-1	+1	0	-1	+1		1	1
0		$\pm$		0				$D_{d1}$	

由表 1 的控制表可以得到：当三个变量的状态为 0 电平时，与其相对应的开关管要关断；而其状态为非 0 电平时，与其对应的开关管要打开。由此可见，使用  $y_a(t)$ 、 $y_b(t)$  和  $y_c(t)$  产生的 PWM 波形就可以用作驱动开关管的通断进而控制前级的整流电路的正常工作。

使用高频变压器的 DC/DC 部分，可以等效成一个单向的 Buck 变换器，其等效电路结构如图 3 所示。该电路的工作状态可以简化描述为三个阶段：①开关闭合，变压器磁芯被磁化，电能通过副边线圈  $N$  由直流电源  $E$  传递给负载；②开关断开，电感  $L_o$  中的电流通过二极管  $D_d$  续流，变压器磁芯通过去磁绕组  $N_d$  经负载回路产生的去磁电流开始去磁；③开关仍在断开状态，去磁已经完成，但电感  $L_o$  仍然通过二极管  $D_d$  续流。

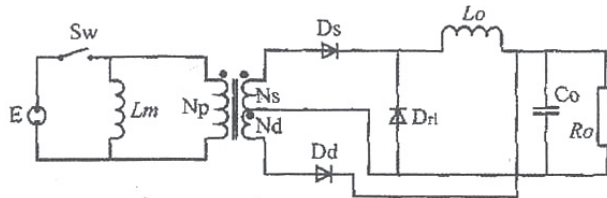


图3 DC/DC 变换环节的等效电路

该装置电路是基于正反激电路设计而成的，通过恰当的设计方法和参数选择，可以保证负载电流的连续性以及原边电感的断续，只有如此，才能保证三个工作状态的正常运行。

#### 4 电路仿真与分析

为了验证该电路设计的有效性，首先在该电路的基础上进行仿真，选择的主要参数为：相输入线电压为 660V，开关频率 20kHz、输出电压 225V，可以为逆变输出 127V 交流提供稳定的直流电源。输入端的电感值和电容值分别为  $175 \mu\text{H}$  和  $23 \mu\text{F}$ 、 $N_p=28$ 、 $N_s=12$ 、 $N_d=3$ 。输出端的电感值和电容值分别为  $130 \mu\text{H}$  和  $1000 \mu\text{F}$ 。输入电压和输入电流的波形及输出电压的波形见图 4 所示。

将输入电流放大 10 倍，得出了如图 4 中输入电压和输入电流的波形，可以看到此时的电压与电流波形在相位上基本吻合，此时的输入功率因数较高。通过闭环调节控制产生相应的 PWM 波形，控制相应的开关管开通和关断来达到以上所述目的。

仿真结果说明了该电路拓扑结构在理论上可以实现煤

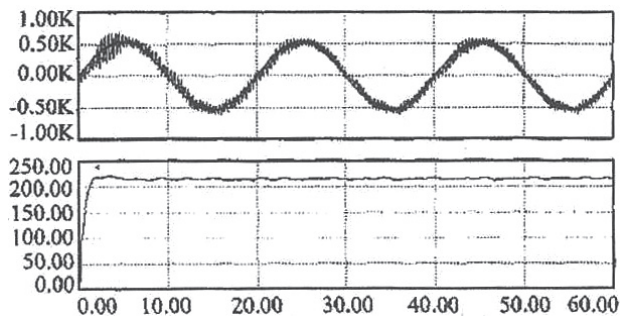


图4 仿真的输入电压、输入电流及输出电压波形

矿井下照明电源需要的输入端整流级及隔离部分的 DC/DC 变换级, 它与传统的电力电子变压器中相应的结构比较, 则其结构简单, 较容易实现。

## 5 小结

文章介绍了一种三相 AC/DC 变换器。这种电路拓扑结构仅仅使用了三个开关管, 大大简化了电路结构, 节省了元器件且实现较容易, 能够比较灵活地应用于煤矿井下无工频变压器电源的设计。该电路采用 PWM 整流方法, 输入端功率因数高, 可以实现单位功率因数运行; 输出电压稳定、调整方便、动作稳定可靠、性能优良。现代电力电子技术的发展为煤矿井下无工频变压器电源的研究提供了理论与技术基础。本文用相关技术方案提出的电路结构, 将随电力电子技术的发展, 采用该技术构成的煤矿井下无工频变压器电源而得到广泛的应用。