

基于三电平逆变及 12 脉波整流的中频直流高压电源的研究

蒋云峰¹ 王爱华² 张之平² 蒋庆龙² 周承鸣² 李保生¹ 田微¹

(1. 武汉大学电气工程学院 武汉市武昌区东湖南路 8 号 430072;

2. 浙江佳环电子有限公司 浙江省金华市将军路 188 号 321000)

摘要 本文分析了二电平逆变器中频电源的不足之处,提出了一种三电平逆变+12 脉波高压整流的 400Hz 中频电源新方案。介绍了其工作原理、技术方案、参数、特点,并做了仿真分析及样机测试。结果表明,采用新方案的中频电源比二电平逆变器中频电源有明显的优越性。

关键词 ESP 三相三电平逆变 三电平空间矢量 PWM(SVPWM) 12 脉波高压整流

静电除尘器(简称 ESP)是环保领域中的重要设备,主要应用于等离子体放电、除尘、除雾、脱水、空气净化,高效除尘脱硫、杂质分离和多种原料回收等。

ESP 基本原理为:含尘烟气通过高压静电场,在电场中粉尘被收集,达到烟气净化的目的。为建立高压静电场,需要高压直流电源。

ESP 的高压电场等效为 R、C 并联负载,其中 C 为高压电场的等效电容,一般为几千~几万 PF,R 为可变电阻,随 ESP 工况随时变化。ESP 为变动负载,在发生闪络或短路时对其直流高压电源的冲击很大,为此必须采取相应措施保证电源可靠、稳定运行。

现有的 ESP 用电源主要有以下几种:单相/三相 SCR 电源、高频电源、中频电源。

中频电源兼有 SCR 电源(低开关损耗、大功率)、高频电源(小体积、高供电性能)的特点;采用 SVPWM 调幅调压,能适应 ESP 大范围的负载变化。且技术条件成熟,能在短期内形成大容量产品,替代大容量 SCR 电源。

1 三电平 SVPWM 逆变及 12 脉波整

流技术介绍

中频电源按其逆变器(产生高次谐波)不同可分为:二电平及三电平逆变器中频电源。按其高压整流变压器(产生低次谐波)不同可分为:6 脉波整流及 12 脉波整流中频电源。

1.1 二/三电平中频逆变器

1.1.1 二电平中频逆变器

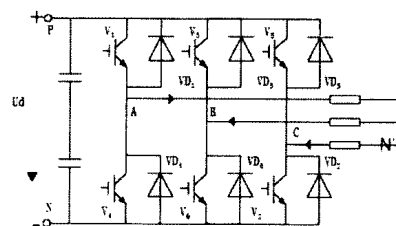


图 1 二电平逆变器

二电平中频电源其逆变器(如图 1 所示)由 6 个 IGBT 构成,其逆变器输出相电压包括两种电平,称为二电平逆变器。

优点:结构简单、开关元件少;控制方案成熟,容易实现。

缺点:输出中频电压谐波大,电压变化率 $\frac{dv}{dt}$ 大;输出中频需要滤波器;IGBT 承受电压高,损耗较大;变压器噪声明显。针对二电平中频电源出现的问题,提出了三电平中频电源的方案。

1.1.2 三电平中频逆变器

三电平中频电源其逆变器(如图 2 所示)由 12 个可关断元件(或可关断元件组成的模块)及 6 个二极管组成的中点箝位型(二极管中点连接到串联滤波电容的中间点)三电平逆变器(NPC)构成,其逆变器输

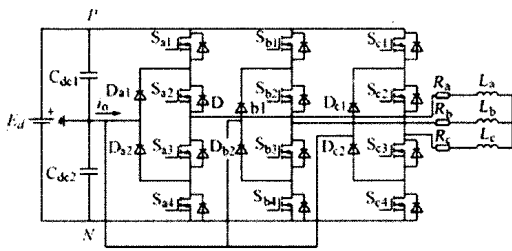


图2 三电平逆变器

出相电压包括三种电平,称为三电平逆变器。

三电平中频电源具有二电平中频电源的优点,克服了其缺点,且技术条件成熟。

优点:(相对二电平中频电源)输出电平数多,输出中频电压谐波小,电压变化率 dv/dt 小;输出中频不需要滤波器;IGBT 承受电压低、损耗很小;变压器噪声小。

缺点:(相对二电平中频电源)变流控制较复杂,开关器件较多,还有电容中点电压偏移及开关器件承担的电流不均等问题,但这些问题目前已得到较好的解决。

1.2 三电平 SVPWM 原理及其实现

三电平逆变器(如图3所示)有 $27(3 \times 3 \times 3)$ 个开关状态,可以产生 19 个基本空间矢量(如图7所示)。三电平空间矢量 SVPWM 和两电平空间矢量 SVPWM 方法一样,都是一种建立在空间矢量合成概念上的 PWM 方法。为了减少输出电压的谐波,在每个 PWM 控制周期 T_s 内将给定电压用该矢量所处的小三角形对应的三个空间矢量来合成(如图4所示)。

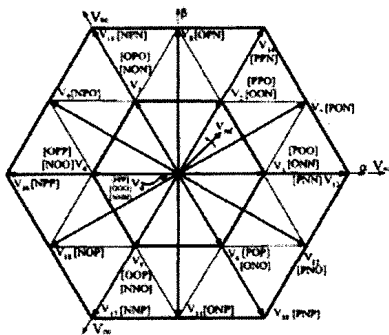


图3 三电平逆变器基本空间矢量

在三电平 NPC 逆变器中,给定矢量 \vec{V}_{ref} (由控制程序决定)可由最近的三个静态矢

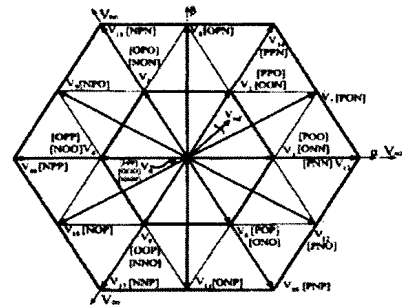


图4 SVPWM 矢量合成图

量合成。例如,在图8中当 \vec{V}_{ref} 落入扇区 I 的 2 区时,最近的三个静态矢量为 \vec{V}_1 、 \vec{V}_2 和 \vec{V}_7 ,则有

$$\begin{cases} \vec{V}_1 T_a + \vec{V}_7 T_b + \vec{V}_2 T_c = \vec{V}_{ref} T_s \\ T_a + T_b + T_c = T_s \end{cases}$$

式中, T_a 、 T_b 和 T_c 分别为静态矢量 \vec{V}_1 、 \vec{V}_7 和 \vec{V}_2 的作用时间。

由 T_a 、 T_b 和 T_c 控制 DSPs (TMS320F28335) 产生 PWM 信号,进而控制 IGBT 实现三电平 SVPWM 逆变。

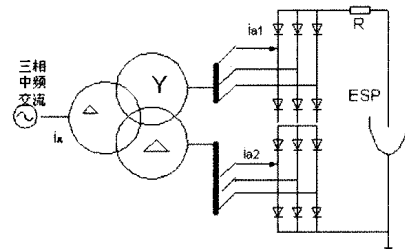


图5 12脉波整流电路

1.3 6/12 脉波高压整流变压器

如图5所示的12脉波整流电路,由移相 30° 的6脉波整流电路2重串联构成,利用变压器二次绕组接法的不同,使两组三相交流电源间相位错开 30° ,从而使整流输出电压在每个交流电源周期中脉动12次,故称为12脉波整流电路。

(1) 6/12 脉波整流变压器输入电流分析(如图6所示):

① 6脉波普通 Δ/Y 变压器电流情形(变压器副边电流 i_{a1}):

变压器输入电流 i_A (谐波与变压器副边

电流 i_a 相同) 中含 $6k \pm 1$ (k 为正整数) 次谐波, 各次谐波有效值与谐波次数成反比, 且与基波有效值的比值为谐波次数的倒数, 5 次和 7 次谐波为主。

② 12 脉波 $\Delta/Y/\Delta$ 变压器电流情形 (变压器副边电流各 $ia1, ia2$):

由于变压器二个副边输出电流大小相等、相位相差 30° , 变压器原边输入电流 i_A (消除了 5 次和 7 次谐波电流) 谐波次数为 $n = 12K \pm 1$, 其幅值与次数成反比而降低。11 次和 13 次谐波为主, 总谐波较 6 脉波大大减小。

(2) 6/12 脉波整流变压器输出电压分析:

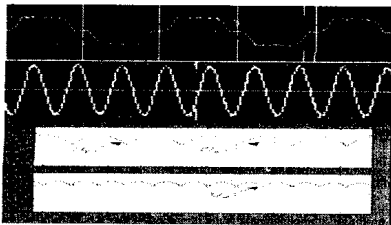


图 6 12 脉波整流电路电压、电流

如图 6 所示, 变压器二组副边整流电压 UY 与 $U\Delta$ 大小相等、相位相差 30° 的 6 脉波波形 (此波形为普通 Δ/Y 整流变压器输出, 其中 $TY = T\Delta = T/6$), 总输出电压 $Ud = UY + U\Delta$, 为 12 脉波 ($Td = T/12$), 可见: 12 脉波比 6 脉波纹波明显减小。

从上面分析可知:

12 脉波整流与 6 脉波整流相比: 输入电流谐波大大减小 (消除了 5 次和 7 次谐波电流); 输出电压纹波明显减小, 纹波频率增加一倍 ($2.4\text{kHz} * 2 = 4.8 \text{kHz}$), 电压更平稳。这正是高压整流变压器期望的结果!!!

2 新型三相中频电源技术方案

2.1 主电路及控制电路原理图 (如图 7 所示)

2.2 主电路工作原理:

① 整流, 滤波环节:

三相交流 AC380V 经整流桥 D1, 滤波电

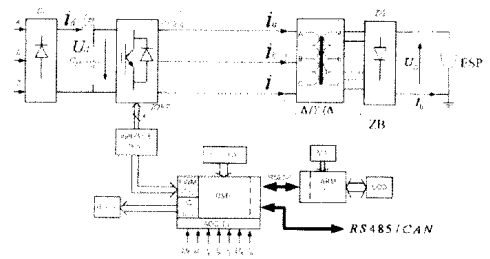


图 7 三相三电平中频电源原理图

路 L_0, C_0 , 得到 530V 左右直流电压, 送至 IGBT 逆变电路。

② 三相高频逆变及高频滤波环节:

直流电压经 IGBT 逆变电路, 产生载波 f_s 为 7.2kHz 或 9.6kHz, 调制波 f_r 为 400Hz 的三相三电平 PWM 脉冲, 送到中频变压器 ZB。

③ 中频升压、整流环节:

400Hz 交流电压, 经 12 脉波中频变压器 ZB 升压、整流得到 80kV 直流电压为负载 ESP 供电。

④ 变流、调压控制原理:

通过三电平空间矢量 PWM (Three-level SVPWM) 可实现输出电压的调节。

2.3 控制电路工作原理 (如图 8 所示)

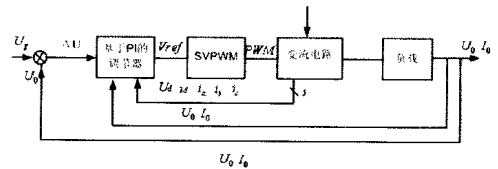


图 8 三相三电平中频电源控制原理图

控制电路包括如下环节:

① 比较环节:

负载电压 U_0 与给定电压 U_g 比较, 得到电压偏差 ΔU , 送至调节器。

② 基于 PI 的调节器:

根据输入电压偏差 ΔU , 采用 PI 调节器, 输出调节量 V_{ref} 给 SVPWM 环节; 另外, 调节器还可以实现输出的软启动, 各种保护功能 (如: 闪络及故障)。

③ SVPWM 环节

根据输入调节量 V_{ref} , 通过三电平 SVPWM 变流控制, 输出 PWM 脉冲给变流电路的 IGBT/IPM 进而控制变流电路的输出。

④ 采样环节

采集负载电压、电流,变流电路的电压、电流及温度信号,送至调节器。

3 新型三相中频电源技术参数

- (1) 输入电压:3相 AC380V \pm 10%
- (2) 输出容量:80kW~160kW
- (3) 输出电压、电流:DC 80kV/1A~2A
- (4) 输出波形:恒定直流/间歇波
- (5) 电源效率:>92%
- (6) 电源功率因素:>0.95
- (7) 变流工作方式:AC \rightarrow DC \rightarrow AC \rightarrow DC
- (8) 工作频率 f_r :400 Hz
- (9) 开关频率 f_s :7.2 kHz/9.6kHz
- (10) 变流控制方式:三电平 SVPWM
- (11) 调压方式:中频调幅调压

(12) 高压整流变压器型式:12脉波 $\Delta/Y/\Delta$ 高阻抗整流变压器

(13) 保护功能:闪络、开路、短路、过流、温度保护等

(14) 冷却方式:IGBT/IPM 强迫风冷;变压器油浸自然冷却

(15) 工作环境:环境温度 $-10 \sim 45^\circ\text{C}$;空气湿度<90%;海拔<1000米

4 方案的技术特点

(1) 采用 AC \rightarrow DC \rightarrow AC \rightarrow DC 的变流工作方式;三相三电平高频逆变,中频 400Hz 升压整流可有效提高电源工作效率,减小电源的体积、重量,减小输出纹波。

(2) 开关器件采用 IGBT/IPM 模块。

(3) 控制核心采用双 CPU:运行控制采用 TI 公司的最新浮点 DSP (TMS320F28335),监控采用 ARM 控制器,二者通过 RS232 通信。多台电源构成控制网,控制网通过 CAN 或 RS485 通信。

(4) 变压器铁芯材料采用薄硅钢或微晶,线包可采用普通漆包线,整流桥可采用普通硅堆,采用 $\Delta/Y/\Delta$ 12脉波整流。

(5) 稳压/恒流控制采用 PI(比例积分)

控制算法,实现无静差稳压/恒流控制。变流控制采用三电平 SVPWM 逆变技术,可减小电压谐波、开关损耗,提高直流利用率。

(6) 完善的保护功能,使电源安全可靠工作。

(7) 控制柜与变压器可分离(也可一体化),控制柜可放置室内。

5 新型中频电源仿真分析(80KV/1A)

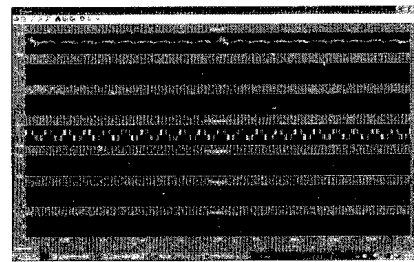


图9 三相二电平中频电源仿真波形

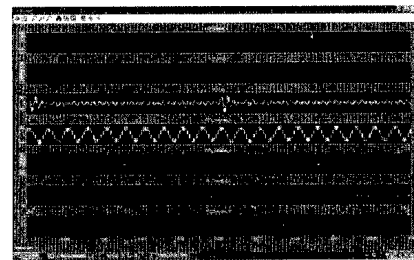


图10 三相三电平中频电源仿真波形

从图9~10(80KV/1A)可知:

① 二电平逆变器输出线电压为三电平波形,非正弦;输出电流接近正弦(变压器电感起滤波作用!)

② 三电平逆变器输出线电压为五电平波形,接近正弦;输出电流接近正弦(变压器电感起滤波作用!)

③ 负载闪络时,电压、电流均发生跳变,对 IGBT 产生一定的电流冲击(大小与变压器阻抗有关)。

从图11可知:对三相二电平逆变电路,SVPWM 逆变输出波形,无低次谐波只有开关频率($N=18$;7.2kHz)附近高次谐波(13,17,19,23,25,29等奇次),THD=42.87%。

从图12可知:对三相三电平逆变电路,SVPWM 逆变输出波形,无低次谐波只有

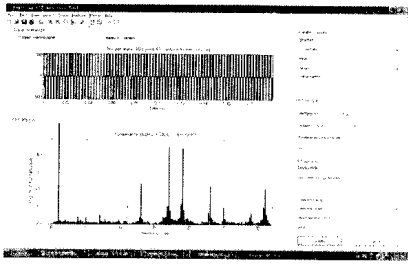


图 11 二电平逆变输出波形谐波分析

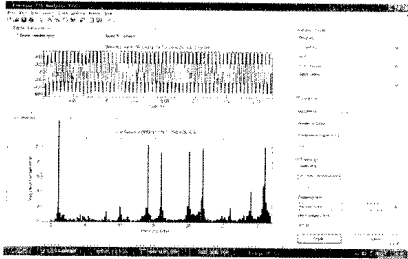


图 12 三电平逆变输出波形谐波分析

开关频率 ($N = 18; 7.2\text{kHz}$) 附近高次谐波 (13, 17, 19, 23, 25, 29 等奇次), $\text{THD} = 26.87\%$ 。

从图 9 ~ 12 可知: 三相三电平逆变电路电压 $\text{THD}(26.87\%)$ 比三相二电平逆变电路电压 $\text{THD}(42.87\%)$ 大大减小, 更接近正弦。而且三相三电平开关频率附近谐波 (10%) 比三相二电平开关频率附近谐波 (20%) 小得多!!

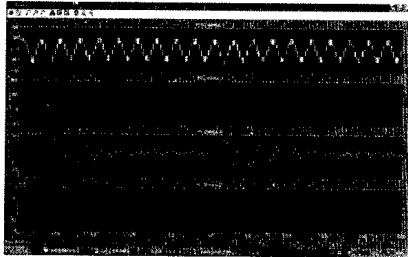


图 13 $M=1$ 变压器原副边电压、电流波形

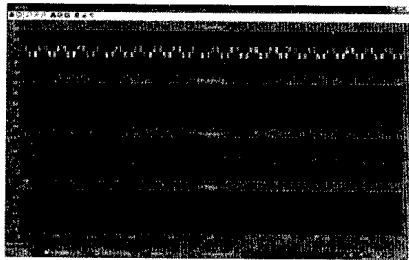


图 14 $M=0.6$ 变压器原副边电压、电流波形

从图 13 ~ 16 可知:

① 随着调制度 $M=1 \sim 0.2$ 的减小, 输出

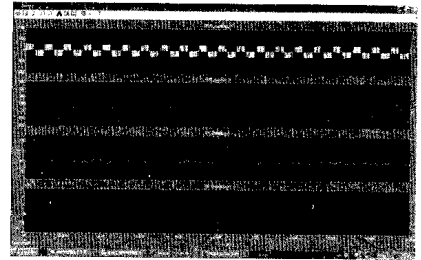


图 15 $M=0.5$ 变压器原副边电压、电流波形

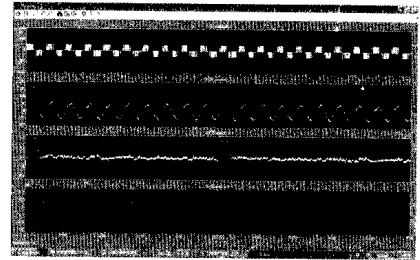


图 16 $M=0.2$ 变压器原副边电压、电流波形

电压、电流随之减小。即可实现调幅调压。

$M = 1: 75.8\text{KV}/1.025\text{A}; M = 0.6: 45.84\text{KV}/0.623\text{A};$

$M = 0.5: 38.35\text{KV}/0.52\text{A}; M = 0.2: 15.42\text{KV}/0.21\text{A}$

② 随着调制度 $M=1 \sim 0.2$ 的减小, 当 M 等于或小于 0.5, 三电平蜕变为二电平。但此二电平波形峰值与同样电源的二电平逆变器产生的二电平波形峰值相比大大减小 ($U_d/2$)。

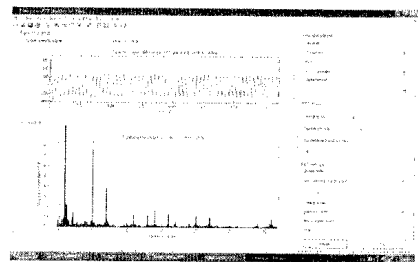


图 17 6 脉波整流变压器原边电流谐波

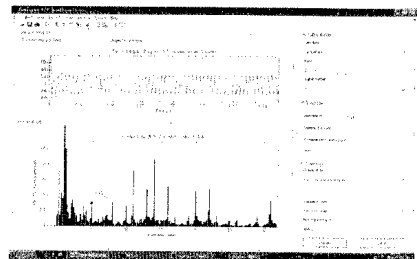


图 18 12 脉波整流变压器原边电流谐波如图 17 ~ 18 所示 ($m=0.99$):

12脉波整流变压器原边电流 THD = 4.3%, 低次谐波为 11、13 次(5、7 次谐波基本消除); 6脉波整流变压器原边电流 THD = 9.26%, 低次谐波为 5、7、11、13 次。

可见 12 脉波整流变压器原边电流 THD 为 6 脉波整流变压器原边电流 THD 的二分之一左右。

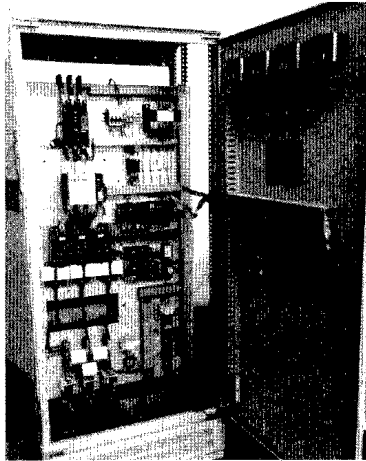


图 19 中频控制柜

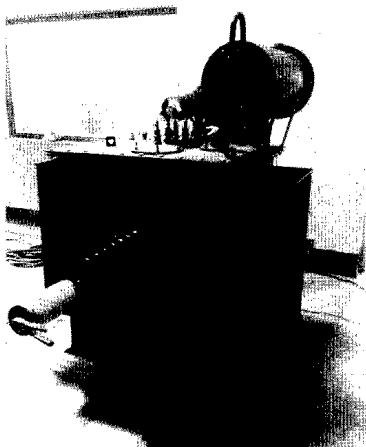


图 20 中频变压器

6 实验测试

从图 21 ~ 22 实验结果表明：
变压器原边电流基本为 400Hz 正弦波形；
负载电压很平直。

7 结论

(1) 本文分析了二电平逆变器中频电源

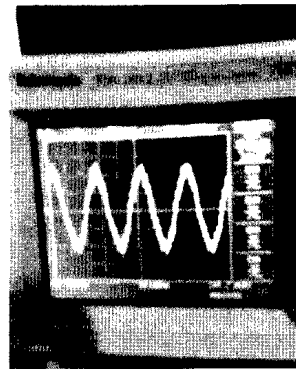


图 21 变压器原边电流

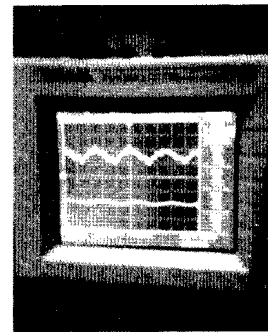


图 22 负载电压、电流

的不足之处,在其基础上提出了三电平逆变器+12脉波高压整流的中频电源新方案;指出新型中频直流高压电源兼有 SCR 电源(低开关损耗、大功率)和高频电源(小体积、高性能)的优点且比三相二电平中频直流高压电源具有更好的逆变波形及输出电压波形;其中,三电平逆变器可以减小电压谐波(主要是高次谐波),12脉波高压整流可以减小电流谐波(主要是低次谐波)并可使输出电压纹波减小。

(2) 文中介绍了新型三相 400Hz 中频直流高压电源的工作原理、技术方案、参数、特点;本方案采用的 NPC 型三电平逆变器、三电平 SVPWM、中频调幅调压控制方式及 12 脉波高压整流等技术,使 ESP 用直流高压电源技术迈上了新台阶。

(3) 通过 MATLAB 软件仿真,证明了此方案的可行性。仿真结果表明:三电平比二电平输出电压谐波大大减少,更接近正弦;当 M 等于或小于 0.5,三电平蜕变为二电平,但此二电平波形峰值与同样电源的二电平逆变

器产生的二电平波形峰值相比大大减小 ($U_d/2$); 12 脉波整流变压器原边电流 THD 为 6 脉波整流变压器原边电流 THD 的二分之一左右, 而且输出电压纹波大大减小。

(4) 实验结果表明: 变压器原边电流基本为 400Hz 正弦波形; 负载电压很平直。

(5) 新型三相 400Hz 中频直流高压电源方案, 已申请了国家发明专利, 具有自主知识产权。通过对样机的例行试验, 各项指标均达到技术要求, 且能稳定运行。

参 考 文 献

[1] (美) Muhammad H. Rashid 电力电子技术手

册 机械工业出版社 2005. 6.

[2] MS320F28335 DSCs Data Manual www.ti.com.

[3] 王兆安 电力电子技术 机械工业出版社 2003. 9.

[4] 陈坚 电力电子技术 高校出版社 2004.

[5] 刘凤君 多电平逆变技术及其应用 机械工业出版社 2007. 1.

[6] 卫三民 译 大功率变频器及交流传动 机械工业出版社 2008. 1.

Abstract: This paper analyzed the primary problems of three-phase medium-frequency power supply based on two-level inverter, applied to electrostatic precipitator (ESP), raised a original design proposal, which utilize three-level neutral point clamped inverter (NPC) as well as 12 pulse rectifier, and introduced the principle, technology proposal, parameters, simulation and test of model machine of this original power supply. The results show that the medium-frequency power supply which adopts the original design proposal has obvious advantages than two-level inverter.

Key words: ESP; three-phase three-level inverter; Three-Level SVPWM; 12 Pulse Rectifier