

# 电除尘器电源在发展和创新中的一些联想

陈焕其 魏文深 张莲英 廖文杰 陈红兰

(厦门市天源兴环保科技有限公司 厦门 湖里园 11 号 3610127)

**摘要** 为了有效提高电除尘效率,满足各种粉尘对大气的排放,达到环保标准日益严格的要求。为此电除尘电源也必须跟随时代的步伐有所发展和创新。所以我们在电除尘电源相继开发和更新中,从单相 SCR、三相 SCR,高频高压逆变,三相中频二电平、三电平电源的技术研发和实施过程中,遇到各种的技术问题和难点,本文从定性角度进行技术分析,针对我公司不同 ESP 电源的发展作一个综合的阐述和心得供参考。

## 1 引言

高压静电除尘电源的研发方向,是尽可

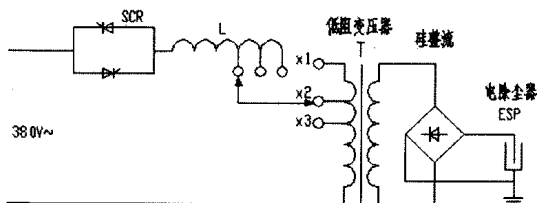


图1 单相-SCR,带电抗器L,低阻抗整流变压器电源

电除尘器负载等效电路是 R、C 并联。进入电除尘器粉尘状况的多样性,R、C 均在变化,尤其 R 变化很大。这就要求电除尘电源有所适应,方能取得好的收尘效果。

单相可控移相调压电源,经过较长期以来的使用和完善,应用单片机控制的软硬件相结合,已达到了相当成熟的地步。控制性能已实现了多样化,如:火花闪络自动跟踪,分段式上升斜率,负载动态阻抗跟踪控制,反电晕的识别与控制,间隙脉冲供电等。在投运中,比电阻  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  的粉尘,普遍已达到  $100\text{mg}/\text{Nm}^3$  (三电场)、 $50\text{mg}/\text{m}^3$  (四电场) 的排放要求。但是,对于比电阻  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  以上的高比电阻粉尘要达到  $50\text{mg}/\text{Nm}^3$  以下

能提高能涵盖所有粉尘的电除尘器的收尘效率,以节能减排为主攻方向。目前,电除尘器在处理高比电阻、高浓度、超微颗粒粉尘中,常常遇到粉尘排放不达标的困扰,这迫使电源同行们有所醒悟和选择,如何推动电除尘电源的进步和创新。

## 2 单相 SCR 电源的局限性

原理如图(1)、图(2)。

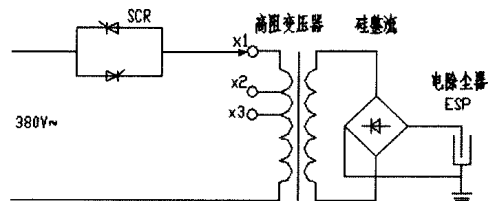


图2 单相-SCR 高阻抗整流变压器电源

的排放标准,普遍很难做到。还要求本体和电源双方的努力并有所突破。

单相-SCR 移相调压电源的不足及应对方法:

①直流输出电压峰值高,如 72KV 等级而言,其脉动系数为 0.67,实际输出峰值电压为  $72 \times (1+0.67) = 120.24\text{KV}$ ,如此高的峰值电压,必然带来频繁的闪络,过小的 SCR 导通角控制使输出平均电压低,电流小。尤其对于高比电阻粉尘电流几乎为零。

②供电电网失衡,功率因素低,总电效率  $< 70\%$ ,电耗大,整流变压器利用系数  $< 0.81$ 。

③不能随意调整间隙脉冲供电的时间,脉冲正负半波必须同时出现,否则带来整流

变压器偏励磁的故障。

④体积大,耗材多,铜、铁(包含铁心)油、均超过同容量其他电源的1~3倍。

⑤为了提高单相—SCR 电源对电场变化的适应能力,多年来不仅控制电路作了不懈努力,增加了多种控制特性和功能,控制精度已达到相当水平。

而配套的整流变压器也作了三次大改动。第一次;如图(1),为了适应电场运行电流偏小,制作了带电抗器的低阻抗整流变压器(两者阻抗相加达到40%以上),改善了工作电流波形,提高了电场运行的稳定性。第二次;为了适应复杂工况带来频繁闪络,降低变化电流的冲击力,把变压器铁心改成口字型铁心。如图(2)原付边绕组采用初级串联或并联输入,付边两柱直流串联输出,阻抗电压达到40~45%,有效地提高了对复杂工况收尘的适应性。把电抗器改善波形和缓冲功能融会到变压器中。第三次;因高阻抗变压器损耗大、成本高,在控制特性不断完善,降低阻抗电压已能满足运行要求的前提下,把整流变铁心改为日字型,阻抗电压仅为32~35%,提高了电流,减少了体积,降低了成本。

⑥整流变的铁心直径计算公式:普遍采用同一公式(除高频电源外) $D = 55 \times \sqrt[4]{P_1}$ ,只是不同变压器铁心,功率 $P_1$ 有所不同而已,如口字型铁心  $P = \frac{P_1}{2}$ ,日字型铁心  $P = P_1$ ,三相—SCR 和中频整流变  $P = \frac{P_1}{3}$ ,所以三相电源铁心直径会大为减小。

随着要求阻抗电压的不同,铁心直径要求乘一个K,如, $D' = KD$ ,阻抗电压高K值取值小,即铜铁比发生变化,铜增多,铁减少(绕组匝数增多), $\lambda_1 = \frac{B \times Se}{450}$ 铁心截面积 $Se$ 小,每匝电压低,在一定电压条件下,匝数增多,同时,阻抗电压高,绕制线包矮而胖,否则相反。

### 3 三相—SCR 移相调压电源如图(3)

三相—SCR 移相调压电源,是在高频逆变电源开发过程中碰到难点,大功率较难实现时,为了尽快填补单相—SCR 电源的不足,中途开发的过渡电源。它与单相 SCR 技术延续性相近而性能优于单相 SCR 的电源。

三相 SCR 调压装置采用三相 SCR 闭环触发控制器,脉冲对称度高,波纹系数小,相间相差120°。采用锁相控制模拟—数字触发电路,有相序自适应功能,投运中不用人为找相序实现定相自然同步,上电封锁,有软启动和各种保护功能。有开环、闭环两种控制模式,开环时手工调节实现火花闪动跟踪。闭环时,采用输出二次电压和电流反馈,运用闭环反馈电流、电压的变化改变触发时间,实现移相调压,它同样有三段上升斜率,改善闪络带来的冲击,实现火花频率自动跟踪。我们运用了现有单相—SCR 成熟的控制技术,因此它可靠性高,有动态阻抗和火花自动跟踪环节和其他完善的保护环节。

#### 3.1 三相—SCR 移相调压电源与单相—SCR 电源相比的有如下优点

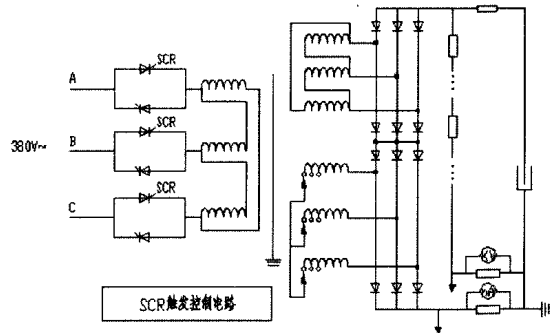


图3 三相—SCR 输出12脉波整流电源

①输出直流电压峰值低:三相整流变绕组采用 $\Delta/y$ 联结6脉波直流输出, $\Delta/\Delta+y$ 联结12脉波直流电源输出。单相—SCR 电源其脉动系数为0.67,为此,如72KV等级输出峰值电压为 $72 \times (1 + 0.67) = 120.24KV$ 。而三相—SCR 电源,当绕组 $\Delta/y$ 联结时,其脉动系数为0.057,输出峰值电压为 $72 \times (1 + 0.057) = 76.1KV$ 。当绕组为 $\Delta/\Delta+y$ 联结时,

脉动系数为0.014,峰值电压为 $72 \times (1 + 0.014) = 73 \text{KV}$ 。在全导通状态下单相-三相两者峰值直流电压输出相比,三相-SCR电源降低了36.7%或39.3%。实践证明,运行电压提高30%以上,运行电流增加2~3倍。大大降低了火花率,提高了运行的稳定性。

②脉动系数的降低,大大提高了运行电压和电流。对复杂工况及电除尘器闪络频繁场合的适应能力大大增强。改造中三相电源若放在一级电场,改善了二、三、四级电场运行电压和电流,实践证明可减排粉尘达30%以上。

③三相电源供电改善了单相供电产生的电网的失衡和对相邻设备的干扰,整流变绕组 $\Delta$ 联结消除了三倍次谐波。上述所举,当 $\Delta/\Delta+y$ 联结时,消除了奇倍次谐波。

④输出电压峰值低,降低了对整流变原付边绕组的耐压和绝缘要求,整流二极管耐压也可减少30~40%。

⑤一、二次相电流有明显减少,如1A/72KV整流变单相-SCR电源 $i_1 = 253 \text{A}$ , $i_2 = 1 \text{A}$ , $i_2$ 平均值=0.5A,而三相电源原边绕组三角联结时, $i_{L1} = 123 \text{A}$ (线电流), $i_{T1} = 74 \text{A}$ (相电流),二次电流 $i_2 = 0.367 \text{A}$ (平均值), $i_2 = 0.577 \text{A}$ (有效值), $i_2 = 0.816 \text{A}$ (基波电流),铜材减少30%,铁心减少23%,二极管通过电流减少。

### 3.2 三相-SCR电源有如下不足:(与高频、中频电源比)

①三相-SCR电源是移相调压,就难免比不上高频和中频电源调幅调压,因移相本身在现场运行时不会是理想状态的全导通,因此纹波还有些大,谐波不能完全消除,脉动系数相对还较大。

②对闪络火花控制,采用三相分别闭环控制较复杂。如果某单相(如A相)闭环控制,当A相火花时,B、C两相无法得到控制,经 $240^\circ$ 后到A相才能限幅或封锁。当然,C相火花时还好,经过 $120^\circ$ 就得到控制。所以火花控制环节冲击还较大。当然,采用

绕组 $\Delta/\Delta+y$ 可减少纹波。

③间隙脉冲供电的实现,也有难以完美实现的弊端。

④体积大,耗油,铜材料多,电耗也是不可忽视的一面,总电效率也只能达到80%左右。

## 4 SCR-IGBT桥式串联谐振逆变电源如图(4)、图(5)

高频逆变电源是国外九十年代末,随着电力电子器件飞速发展和完善的产物。虽然技术难度相对较大,但是,由于其对电除尘复杂工况和粉尘适应能力强,使得国内外同行愿花很大的财力、物力、人力进行不懈的努力,进行艰辛的研发。与其他电除尘电源相比有如下特点。

### 4.1 特点和优点

①输出的直流电压纹波极小,基本成一直线。使得对电除尘复杂工况,高比电阻粉尘运行电压和电流有明显的提高,一般相同工况电压可提升30%以上,电流增加2~3倍,闪络次数明显减少,采用改变不同占空比的间隙脉冲供电效果也较好。

在改造老式电源中,只要第一级电场更换高频电源,后级电场电压、电流就有明显提高,大大改善了电除尘运行条件,收尘效果可减排30%以上。

②可随意实现调整不同占空比的间隙脉冲供电,不用担心同步的问题,控制灵活多样。

③体积小,重量轻,只有常规电源同容量的 $1/3 \sim 1/4$ ,各种材料大为节省。

④可节能30%以上,功率因素高,其电效率可达92%以上。

通过三相可控整流供电,有利电网平衡。调幅、调压更适应电场负载剧变的场合。

### 4.2 高频逆变电源的难点和不足

#### 4.2.1 高频整流变压器

①高频电源频率高,功率大,要求超微晶材料

铁心材料既不能用铁氧体(容量做不大,磁密低)又不能用莫合金(频率容量均有限)。即使用非晶材料,使用频率也偏低(最高不超过10KHZ)。比较理想是采用纳米超微晶,磁密高,损耗小。

铁心用闭环口字型,最好用阶梯不同片宽的微晶薄片叠加成圆形。开环方形铁心漏磁大,损耗多,自动绕线也困难。我公司采用圆截面闭环口字型铁心,线包用自动环形绕线机绕制。

②通过试验找到相关技术参数

我们在试制中,容量与截面积关系计算公式,查无现成的公式,只得通过试验摸索获得。从低电压,小电流做起,如100、400、600mA,20、60、80KV,通过反复试验找到相关符合要求的参数。

目前,计算线圈匝数有标准计算公式,

$$N1 = \frac{VI}{4 \cdot B \cdot Se} = \frac{VI Tn}{\Delta B \cdot Se}$$

其中  $\Delta B \cdot Se$  (有效截面积),安全死区时间  $Tn$  脉宽通过试验取得。

铁心的窗高、窗宽,由高频绝缘的横向、纵向要求和线包占空面积而定。

③高频整流变成功与否的关键是减少漏感和分布电容,并符合各等级耐压要求。

4.2.2 控制电路环节的设计制作,如图(4)、图(5)

试制中,我们始终用的 IGBT 半桥普通模块,非 IPM 模块。虽然给试制带来分布参数引起的  $L \frac{di}{at}$ 、 $\frac{du}{at}$  吸收的困难,但通过努力实践消除了出现的应力,增长了实践知识。

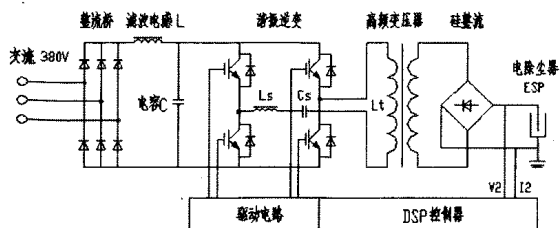


图4 三相整流IGBT桥式串联谐振逆变电源

①高频逆变电源,虽然火花电压冲击也不小,但是带来火花冲击的时间短(几毫秒,甚至微秒级)。对于微秒级开关的IGBT冲击的幅度还是较大的。为了减缓冲击应力,往往逆变的主电路均采用桥式串联和并联谐振。其谐振频率为  $f_r = \frac{1}{2\pi LrCr}$ , 谐振电感  $Lr = Ls + Lt_{漏}$ , 为此,为了在一定谐振频率的状态下,保证  $L_{附}$ 。要求高频整流变的漏感要小,分布电容也要小。否则,不仅影响谐振电流波形,也使软开关难于实现。

②尽量减少布线电感和分布电容。要求控制柜母线和控制环节有良好吸收应力的措施。

③采用数字微处理器 DSP,有利于加快处理和传输速度,完满实现各项控制功能和保护功能。

④前级采用 SCR 可控硅三相调压,代替三相不可控调压。其好处有二 a、电网电压的波动使母线电压也会随之波动,逆变器输出电压也跟着非负载要求的电压而变化。如,电网电压高,不可控整流输出也升高,为了输出电压稳定,调频控制方式必须降低开关频率,导致逆变器进入硬开关状态,引起逆变器主回路电流、电压应力增加,不利于开关器件的安全工作。调频控制方式无法解决电网电压变化问题。b、复杂工况带来电场频繁闪烁,完全调频控制方式必然频繁改变开关频率,当开关频率过低时,高频整流变压器阻抗电压也降低,造成电流冲击应力  $L \frac{di}{at}$  增大,使开关器件可靠性降低。

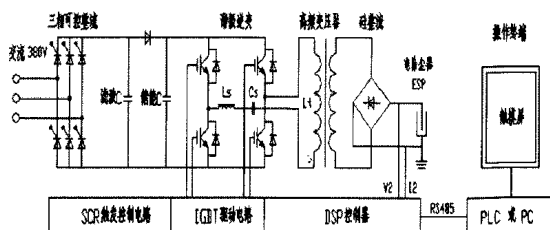


图5 SCR-IGBT桥式串联谐振逆变电源

三相-SCR可控硅调幅调压,可以根据需要调整母线电压0~550V,有利于IGBT实现软开关机,改善了开关器件工作条件。使开关频率与整流变压器阻抗电压保持相对稳定。通过三相可控硅调幅、调压,有利于逆变电路使定宽、调幅、调频(PFM)的实现。

IGBT模块实现定宽调频、调幅是由DSP芯片统一控制。DSP依据电场工况给定母线电压和开关频率,通过A/D转换器与DSP的高速采样,利用软件方法检测火花。当电场发生火花时,迅速降低开关工作频率,然后快速恢复。同时,也控制母线电压的降低,使电场介质得于恢复,有效地降低了对开关器件的冲击幅度。由于IGBT开关时间为微秒级,所以火花封锁时间很短,然后根据需要调整母线电压,使IGBT很快得于恢复,避免火花的连续发生。通过DSP微处理器的高效率工作,使设备始终处于最佳工作状态。

有了三相可控硅调幅、调压,不仅闪络频率大为减小,避免了火花的重复发生,使冲击引起的电流、电压应力随之减小,提高了电场运行的稳定性和器件的可靠性。

## 5 三相二电平、三电平逆变输出中频400HZ,整流输出6脉波或12脉波直流高压电源的研发

前述,单相-SCR移相调压电源,其直流高压输出峰值高,引来电场频繁闪络、电流小;三相-SCR移相调压电源,实现三相分别闭络闪络跟踪和间隙脉冲供电完满实现比较困难,且三相-SCR电源体积大,耗材多;高频逆变电源,虽然兼有目前开发的各种电源的优异性能,但是,容量做大其难点也是显而易见的。尤其,高频整流变与控制柜不可分别设置,户外使用环境很差,虽用高压电缆可以弥补,但是,使用者较难以接受。为此,就迫使我们在上述电源的相继研发中,从中得到启发和联想,开发性能相对优异,技术比较成熟的三相二电平及三电平中频电源。

三相二电平、三电平中频电源,不仅兼有

单相、三相-SCR移相调压电源的频率低、开关损耗小,功率易于做大,而且具有高频电源体积小,电效率高,纹波小(纹波与高频电源处于同一数级)的优点,对电除尘电源纹波要求不是特别苛刻情况下,无非是一种好的选择。采用三相二电平、三电平电源的SPWM/SVPWM,调幅、调压特点,正适合于ESP电场负载多变的场合。它借助于电压空间矢量合成的PWM方法,每个PWM控制周期内将给定电压,用该矢量所处的小三角形对应的三个空间矢量进行合成。运用变频调速的六角形或圆形轨迹矢量合成的计算方法,应用到中频逆变电源控制中来,也是一个成熟的技术应用。

### 5.1 三相二电平逆变输出400HZ 6脉波或12脉波直流高压电源图(6)

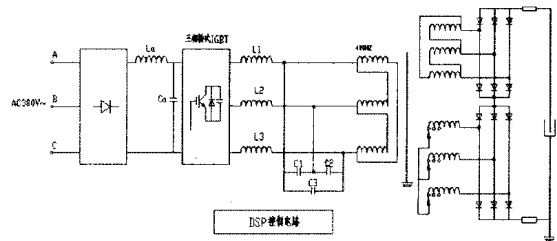


图6 三相二电平12脉波电路原理图

三相二电平逆变电源是直流电压通过三相桥式IGBT逆变电路,产生载频 $f_s=4.8\sim 9.6\text{KHZ}$ ,调制波 $f_r=400\text{HZ}$ (中频400HZ的产生,是三相PWM的脉冲经过三相滤波电感和电容生成400HZ正弦波)输入中频 $\Delta/\text{y}$ 变压器,经过整流获得直流高压80KV。

其调压的原理,是通过空间矢量PWM(SVPWM)实现输出电压的调控提供给ESP。三相二电平逆变6脉波是整流变压器 $\Delta/\text{y}$ 付边绕组星形(y)联结。或 $\Delta/\Delta$ 付边绕组( $\Delta$ )三角形联结,三相全波整流输出的一个周期内脉动6次,二组三相交流电源相间相差 $60^\circ$ ,一个周期内整流输出6个脉波。

12个脉波是整流变压器付边绕组由( $\Delta+\text{y}$ )三角形与星形联结串联输出的,两组三相交流电源一个周期内输出脉动12次的脉波。三相6脉波只消除了3倍次谐波,其主

要是 5、7 次谐波。12 脉波则去除了 3、5、7 次谐波,其主要谐波是 11、13 次谐波,所以,比 6 脉波谐波大为减少。其更接近高频电源的波纹。

### 5.2 三相二电平逆变电源的优点

①与单相、三相-SCR 移相调压电源相比,体积小,重量轻,约为同容量工频电源的 1/2 ~ 1/3,输出直流电压峰值低,更接近高频电源的纹波。

②中频电源整流变与控制柜可异地设置,设置方式与常规电源相同。因其调幅、调压控制方式发生火花时, $L \frac{di}{dt}$ 、 $du/dt$  均较小,便于采取应力吸收措施。

③功率易于做大,制造 1A/80KV → 3A/80KV 技术延续性好,控制环节基本相同,与常规电源扩大容量相近,只是 DSP 软件有所调整。

④二电平逆变电源控制,是通过 SVPWM 逆变技术。即通过电压空间矢量脉宽调制方式,通过调制  $M = \frac{V_0}{V_r}$  的变化实现调幅调压。电场发生闪络时采用调整载波频率实现控制。

⑤中频整流变压器制造、绕制工艺与单相、三相-SCR 相近,但是,铜、铁(含铁心)、油大为减少。

中频逆变电源其变压器铁心一般采用矽钢片,为了适应 400HZ 的磁密,其厚度采用  $\delta_{0.21}$  或  $\delta_{0.23}$ ,损耗比  $\delta_{0.35}$  小,亦可采用非晶材料。比高频电源采用超微晶,成本低、制造工艺简单,避免机械应力和退火工艺。

⑥中频电源,开关频率较低,有利于 IGBT 模块的安全工作和 IGBT 的选用,载波载频  $f_s = 4.8 \sim 9.6 \text{KHZ}$ ,  $U = \frac{f_s}{f_r}$  载波比越大,谐波越小通常  $f_s = \frac{2.4 \rightarrow 9.6}{0.4} = 6 \sim 24$ 。

### 5.3 三相二电平逆变电源也有美中不足

①三相二电平中频电源,用 6 只 IGBT 或 3 对半桥或三相全桥 IGBT 模块,其控制

电路软、硬件相对复杂。整流变体积比高频电源大些。

②为了实现变流输出 400HZ,要配置滤波电感和电容,且参数要多次试验调整。

噪音相对较大。

### 5.4 三相三电平逆变变流输出 400HZ 12 脉波直流高压电源的研发图(7)比二电平逆变电源优点

①三相三电平逆变电源变流输出 400HZ,省掉了滤波电感和电容。噪音明显减小。

②IGBT 增加 50%,12 只 IGBT 或 6 对半桥 IGBT,或二付三相全桥 IGBT 模块,IGBT 耐压减少 50%,有利于模块的选配,工作频率和耐压低了,可靠性相对提高。

③采用三相全桥 IPM 模块,省掉了附加应力吸收环节,可靠性明显提高,采用二极管、电容、电阻混合钳位,基本上解决了模块可靠性问题,为 ESP 电源的创新,开阔了视野。

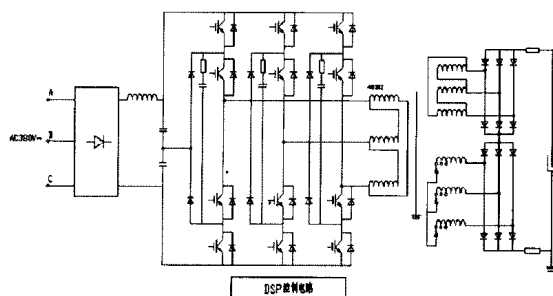


图 7 三相三电平 RDC 混合嵌位 12 脉波电路原理图

### 参 考 文 献

- [1] 《一种串联谐振高频、高电电源设计》谢小杰。
- [2] 《高频脉冲变压器设计》彭彩凤、于志、王智勇。
- [3] 《一种用于低温等离子体和电除尘的三相电源》林继红。
- [4] 《混合封装三相控式电力电子集成模块研究》张华、曾翔君、杨旭、王兆安。
- [5] 《地铁动车组三相辅助逆变器电源》广州地铁运营公司 陈国清。
- [6] 《大功率变频电源的优化设计》山东博奥斯有

- 限公司 赵勇、耿传勇.
- [7] 《基于空间电压矢量的最小开关损耗 PWM 技术》西安理工大学 袁泽剑、钟彦儒.
- [8] 《三电平 SVPWM 的等效简化控制算法》广东电力设计研究院 刘继权、张茂松.
- [9] 《现代电力电子磁技术》杨玉岗编著 科学出版社.
- [10] 《IGBT 和 IPM 及其应用电路》周志敏、周纪海、纪爱华编著 人民邮电出版社.
- [11] 《高压大功率交流变频调速技术》张皓、续明进、杨梅编著 机械工业出版社.
- [12] 《ESP 用三相中频直流高压电源的研究》蒋云峰、张之平、蒋庆龙、宋荣群、周承鸣、汪飞、杨希.
- [13] 《大容量 400HZ 静止变频电源的研制》白小青、石涛、李辉 西安爱科电子有限公司 卢加林、苏颜民、谢力华 西安交通大学.
- [14] 《三电平逆变器 SVPWM 直接转矩控制方法》韩黎明 中国铝业股份有限公司 大功率交流技术杂志.
- [15] 《变频技术基础与应用》曲学基、曲敬铠、于明扬编著 电子工业出版社.
- [16] 《基于单极性多载波调制的新型 DRC 混合箝位变流器研究》朱颖、胡书举、李建林 中国科学院电工研究所 中国科学院研究生院