



分类号: TM433 密 级: 公开
UDC: 学校代码: 10127

内蒙古科技大学

硕士学位论文

论文题目: 基于 MATLAB 的高压静电除尘系统
电源技术研究

英文题目: The Simulation and Research on High-
voltage Electrostatic Precipitator
Power Supply based on MATLAB

学 位 类 别: 硕士

研 究 生 姓 名: 付盼 学号: 2014022285

学科(领域)名称: 控制工程

指 导 教 师: 李文涛 职称: 教授

协助指导教师: 王新春 职称: 工程师

2016 年 6 月 10 日

独 创 性 说 明

本人郑重声明：所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含为获得内蒙古科技大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

签名： 付盼 日期： 2016年6月12日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解内蒙古科技大学有关保留、使用学位论文（纸质版和电子版）的规定，即：本人唯一指定研究生院有权保留送交学位论文在学校相关部门存档，允许论文在校内被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。在论文作者同意的情况下，研究生院可以转授权第三方使用查阅该论文。

（保密的论文在解密后应遵循此规定）

签名： 付盼 导师签名： 李之府 日期： 2016年6月12日

摘 要

在“厚德载‘雾’，自强不‘吸’”的现代社会，静电除尘器以其能控制烟气颗粒及粉尘排放物达到空气净化的优势备受关注。目前被广泛应用于工业发展的当属应用于火力发电行业的供电电源，但其不仅成本较高，并且还存在除尘器除尘效率很低的问题，以及能耗很大（用电量大致占火电厂总耗电量的 5%）。相较于传统供电电源，高频高压静电除尘电源不但可以提供平稳的直流电压，响应时间短，能耗小（比工频电源节能 20%），并且能够满足大气中由烟尘颗粒所形成的污染物的释放标准，所以高频高压静电除尘供电电源具有很好的发展前景。电源是静电除尘设备的关键部分，因此设计及研究静电除尘系统供电电源，不仅可以使静电除尘器的工作效率得以提高，而且可以保证系统的稳定运行。

文章就高频高压静电除尘设备的电源系统做了详细的分析和研究，针对其高效节能的特点，对主电路和控制回路做出详细的设计及仿真。本文主要介绍了电源系统中主电路的设计方案和对控制系统建模仿真与研究，控制电源系统稳定输出和提高除尘效率。

首先，本文阐述了静电除尘技术在现代工业中的发展趋势，通过对各种除尘方式的对比，罗列静电除尘器的独有优势。再对静电除尘器的工作特性和特殊环境加以分析，并且对几种常用的供电方式进行分析和比较，对比各种供电方式的优缺点，得出了高频高压静电除尘供电电源发展得必然趋势。

其次，对高频变压器的参数特性进行分析，结合软开关技术，在对传统串联谐振逆变器和移相全桥变换器的工作原理进行分析并比较，对串联谐振逆变器和移相全桥变换器各个阶段工作模式展开理论分析和选择。利用 MATLAB 对 LCC 谐振逆变器动态变化的工作模式进行建模与仿真，通过对仿真结果的总结，最终选择了移相全桥变换器作为主要仿真部分。对主电路进行设计以及对电路各部分进行选型设计，主要包括三相全桥不控整流滤波电容的计算，逆变桥中 IGBT 选型，高频变压器磁芯选择和原副边绕组匝数的计算，以及对高压整流桥中整流二极管进行选择。

然后，分析了静电除尘电源控制系统的控制原理，制定合适的控制策略，提出对系统中闪络进行判定和处理的方法，提出了输出电压和输出电流共同作为判定条件的方法，对火化率控制算法进行分析和研究，采用三段式火花跟踪控制的方式对供电电源进行控制，使电源系统输出的电压更加稳定、可靠。

最后，利用 MATLAB 软件中的 Simulink 工具箱对静电除尘器电源系统的主电路中各个部分和控制部分进行模型搭建，通过闪络判定条件分析控制策略并不断完善，然后对移相全桥变换器进行建模，根据闪络判定条件，分别对输出电压闪络判定和输出电流闪络判定进行建模，通过对移相全桥变换器的 PI 控制，对变压器原边侧电流电压在不一样的占空比情况下进行仿真，给出不同情况下的输出波形，然后以输出电压的变化偏差为基准，进行单环和双环控制，并对结果进行了对比分析，最后对输出电压进行了三段式升压的控制，实现了三段式火花跟踪控制方式，使控制系统更加稳定。

关键词：高频高压；静电除尘；开关电源；软开关；MATLAB 仿真

Abstract

In current society in which profound virtue carries with fog which self-reliable men won't breathe. Electrostatic precipitators are concerned about the advantages of the controlling of the smoking particles. The mode of fundamental frequency power supply applied in the thermal power industry is widely used at present. However, there are some problems of low efficiency, high cost, and high energy consumption (it takes about 5% of the power consumption of the heat-engine plant). Compared with the mode of fundamental frequency power supply, high-frequency electrostatic precipitator power supply not only can provide a more stable DC voltage, shorter responded time, and less energy consumption (it's about 20% than the fundamental frequency power supply), but meets the emission standards of smoking particles, so high-frequency power supply of electrostatic precipitator has a very great developmental prospects. The power of electrostatic precipitator is the key part of a dust removal equipment, therefore, the design and research of power supply system for electrostatic precipitator system has really important significance in improving the efficiency and keeping a stable output of a electrostatic precipitator.

This paper analyzes and studies the high frequency electrostatic precipitator power system with high efficiency and energy saving. It mainly introduces the design scheme of the main circuit of high frequency electrostatic precipitator power supply and the research on control system to keep the output of the controlling power supply system stable and to improve efficiency of the dust removal.

Firstly, this paper mainly introduces the developmental status of electrostatic dust removal technology at home and abroad and the developmental trend in modern industry. It also analyzes the working principles of electrostatic precipitator and compares several common power supplies. The conclusion is drawn that the inevitable developmental trend of high frequency electrostatic precipitator power supply by the advantages and disadvantages of the different models of power supplies.

Secondly, the article analysed the characteristics of high-frequency transformer parameters. The working principle of the traditional series resonant inverter and the phase

shifted full-bridge converter are analyzed and compared. Also, the theoretical analysis and the selection for the working mode of the series resonant inverter and the phase shifted full-bridge converter are analyzed and compared. Through the results of the simulation about the series resonant converter, the phase shifted full-bridge converter is finally chosen by the model. The main circuit is designed including three-phase full bridge rectifier, IGBT full bridge inverter, high frequency boost transformer and high voltage rectifier. The components of the circuit are selected and designed.

Then, the paper analyzes the controlling principles of the electrostatic precipitator power supply controlling system, and develops a suitable controlling strategies. The judgmental and processing method of spark in the system was put forward in the article. A method is proposed to the judgmental requirement which includes the output voltage and output current. Using the way of three section type spark track to control the power supply based on which the cremation rate control algorithm is analyzed and studied, the output-voltage of the power supply system is more stable and more reliable.

Finally, the simulation and analysis of the main circuit of each part of the circuit and controlling strategies of the control system are carried out by using Simulink toolbox in the software MATLAB to analyze and improve the controlling strategy. And then, the models about the phase shifted full-bridge converter and the flashover determination are established. Based on the simulation of phase shifted full-bridge converter with PI controller, the waveform of current and voltage on the primary side of the transformer with different duty cycle is simulated. The single-loop and double-loop controlling means are realized by the variation of the voltage reference value, and the results concerning the single-loop and double-loop controlling means are compared and analyzed. At the end of the paper, the output voltage is controlled and shows the control of three phase boost, realizing the mode of three section type spark tracking control, which makes the whole system more stable.

Key Words: *High-frequency and high-voltage ; Electrostatic precipitator ; Switch power supply; Soft switching; Simulation of MATLAB*

目 录

摘 要.....I

Abstract.....III

引 言..... 1

1 静电除尘器简介.....3

 1.1 静电除尘器工作原理..... 3

 1.2 静电除尘器的电特性..... 5

 1.2.1 静电除尘器的放电程度..... 5

 1.2.2 与除尘效率相关因素..... 6

 1.3 国内外发展现状..... 9

 1.4 本文主要工作..... 12

2 静电除尘电源主电路..... 14

 2.1 高压静电除尘电源分类..... 14

 2.1.1 单相可控硅供电电源..... 14

 2.1.2 三相可控硅供电电源..... 14

 2.1.3 高频 IGBT 逆变电源..... 14

 2.2 高频变压器..... 15

 2.2.1 高频变压器特性分析..... 15

 2.2.2 负载模型..... 17

 2.3 软开关变换器..... 18

 2.3.1 软开关技术的应用..... 18

 2.3.2 LCC 谐振变换器..... 19

 2.3.3 ZVS-PWM 移相全桥变换器..... 24

 2.4 本章小结..... 25

3 主电路参数计算..... 26

 3.1 三相整流输入电路..... 26

3.2 整流回路中滤波电容的设计.....	27
3.3 主功率开关器件选型.....	29
3.4 高频变压器设计.....	30
3.5 高压整流桥设计.....	31
3.6 本章小结.....	31
4 高压静电除尘系统的控制.....	32
4.1 控制方式选择.....	32
4.1.1 数字 PID 闭环控制.....	32
4.1.2 闭环控制实现.....	33
4.2 闪络控制.....	34
4.2.1 闪络判定.....	35
4.2.2 闪络处理.....	37
4.2.3 控制方式.....	38
4.2.4 反电晕.....	40
4.3 本章小结.....	41
5 MATLAB 仿真与分析.....	42
5.1 静电除尘器电源仿真.....	42
5.1.1 单相可控硅电源仿真.....	42
5.1.2 三相可控硅电源仿真.....	43
5.1.3 高频 IGBT 逆变电源仿真.....	44
5.2 主电路仿真.....	45
5.2.1 三相整流部分.....	46
5.2.2 IGBT 逆变部分.....	46
5.2.3 移相 PWM 生成.....	47
5.2.4 变压器以及副边侧整流硅堆部分.....	49
5.3 控制回路仿真.....	49
5.3.1 主回路中移相全桥变换仿真与分析.....	49
5.3.2 闪络判定仿真模块.....	52

5.4 本章小结.....	53
结 论.....	55
参考文献.....	56
附录 A 静电除尘电源系统仿真模型.....	59
附录 B 静电除尘器电源装置主电路.....	60
在学研究成果.....	61
致 谢.....	62

引言

电子器件集成度高、厂用设备运转稳定性强、智能自动化程度高是现代工业发展的特点。但在科技高速发展的同时，大气污染也随之严重起来，尤其是直接进入人体呼吸道的烟气粉尘颗粒，严重危害着人类的身心健康。所以在工业发展中，关于烟气颗粒的处理问题已受到社会各界的重视，因而，烟气粉尘处理技术对于现代工业各个行业至关重要。世界各国已颁布很多有关限制工业烟气粉尘浓度排放的相关法律，我国对此也尤为重视，例如已经颁布实施的《锅炉大气污染物排放标准》和《固体污染源废气排放标准》^[1~3]，要求对烟尘排放进行强制管制。除尘器除尘力度的强弱不仅是全人类关注的问题，更是与我国工业发展有着不可分割的关系。除尘器按照其功能可以分为机械式除尘器、湿式除尘器、袋式除尘器和静电除尘器^[4]。这里主要介绍静电除尘技术。

静电除尘器的工作过程主要包含空气分子电离、灰尘颗粒带电、带电灰尘颗粒的收集以及粉尘清理几个部分，具体过程是将含有灰尘颗粒的空气通过很强的电场，使烟气颗粒带电以后，在烟气颗粒经过电极的过程中，荷电粒子将会被吸附到电极上，即荷正电灰尘粒子吸附在负电极上，荷负电的灰尘粒子吸附在正电极上，这样就可以达除去灰尘颗粒的效果^[5~6]。静电除尘相比于其他除尘方式效果颇佳，但是静电除尘器的工作效率容易受到灰尘性质的影响，容易使得除尘效率不能始终维持在一个较高的水平。

静电除尘器的工业进程演变和其供电方式以及它的控制系统有很大的关系，静电除尘器供电系统通常包含三相整流部分，逆变部分，升压部分以及控制系统。变压器技术是现如今最经济实惠的高压设备，在现代科技的进步下，变压器体积不但越来越小，性能也越来越好，节约很大一部分成本。五十年代初期，整流方式比较单一，通常使用机械式同步整流的办法^[7~9]。后期，随着电子技术的不断打造，电子技术逐步取代了早期的同步整流方法，但是由于其发展还未完善，因此并未取得广泛发展。1956年开始用硒整流器但体积庞大^[10]。六十年代初期，硒整流器由于体积庞大的困扰被逐步淘汰，取而代之的是发展迅速的硅整流器^[11]。静电除尘器的控制方式也随着科技的发展在更新换代，技术越来越成熟，系统愈加完善，控制系统经历了由先前的费时费力的人工操作到设备完善的自动化过程的发展。变压器设备也经历了由自耦到直流磁场再到特殊材料的磁芯最后到饱和电抗器的发展经历^[12]。

事实上，饱和电抗器才是静电除尘系统步入自动控制的开端。但是由于这种方式存在明显的缺陷，性能不稳定，所以其很快被可控硅方式所代替。可控硅具有独特的性能，使得静电除尘器的供电方式获得了比较稳定的控制方式^[13~15]。不但可以很快的达到

要求的电压值，例如，不仅可以在发生闪络时迅速降压，而且也可以在整个系统恢复后使电压再达到正常工作的值，不仅节省了时间，并且具有稳定的响应特性，使得静电除尘器一直工作于高输出的状态。在现代工业技术的熏陶下，静电除尘器的控制系统跟随现代电子的步伐，由晶闸管时代快速过度到集成电路时代，最终发展到由电脑自动控制的互联网时代^[16]。静电除尘器的供电方式不仅得到改善，变压器得以节约成本，控制系统更是得以稳定，输出得以控制，在稳定静电除尘器控制系统的过程中仍然能够保持静电除尘器的高效率输出。

静电除尘器主要是由除尘器本身构造以及其供电系统构成，供电系统的稳定性与否以及电源性能的好坏会对除尘器的除尘效率产生极大的影响，如若使除尘器达到理想的除尘性能和较高除尘效率，好的除尘器不仅构造性质很重要以外，还要有一个良好的电源与其相匹配。伴随着新一代电子技术迅速兴起，绝缘栅双极型晶闸管被大力推广，高频变压器的普及逐渐被关注，是静电除尘器电源的重要发展方向^[17~19]。高压静电除尘器除尘效率高，粉尘处理范围广，损耗小，系统运行稳定，可靠性高等有点，是现代工业中备受瞩目的一种除尘方式。

1 静电除尘器简介

1.1 静电除尘器工作原理

在当前工业的发展中，除尘方式有很多种，按照除尘器的运行原理大致可以分为四大类：机械式除尘器、过滤式除尘器、湿式除尘器以及电除尘器^[20]。这几类除尘器的对比如下。

表 1.1 四类除尘器的对比

除尘器类型		优点	缺点
机械式除尘器	重力沉降室	构造简易，节约成本，容易修理，比较耐用	工作效率低，设备庞大，一些微粒不能处理
	惯性式	构造简易，成本低，便于维护	工作效率低，微粒不能处理
	旋风式	结构简易，容易修理，性能比较稳定	对细灰颗粒（小于 $5\mu m$ ）使用不佳
过滤式除尘器	袋式	工作效率较高，操作方便，结构简单，性能稳定	应用范围有局限，不适合粘性烟气颗粒，占地面积较大
	颗粒层式	承受温度能力强，适应性强，滤料成本低	对于微细粉尘工作效率不高，占地面积大
湿式除尘器		除尘效率高，适用范围广，可以净化有害气体，结构简单，占地少	水资源消耗大，需二次处理，不适用于疏水性气体
电除尘器		除尘效率高，输出稳定，节能，处理量大，变压器体积小，节省成本	不容易变化，受灰尘种类影响，占地面积较大

通过对比，静电除尘器的工作特性较稳定，以其独特的优势独占鳌头，因此静电除尘器是现代科技生产中应用较为广泛的空气净化方法。为了实现电除尘，最重要的是有很多能够使灰尘颗粒荷电的气体离子，但是气体离子的获取要有一个即简便又节约成本的方式。在如今工业中，产生气体离子的办法还比较单一，主要是通过电晕放电来实现

的。所谓的电晕放电即空气中发生放电的现象，要使放电有规律的话，需要所形成的电场具有不均匀性，即在极板间产生非均匀电场，极板的电极包括一对平行板以及位于极板间的细导线。静电除尘工作原理大致可以总结为部分：空气分子电离、烟气颗粒荷电、粒子运动、集尘^[21]。静电除尘器基本原理图见图 1.1。

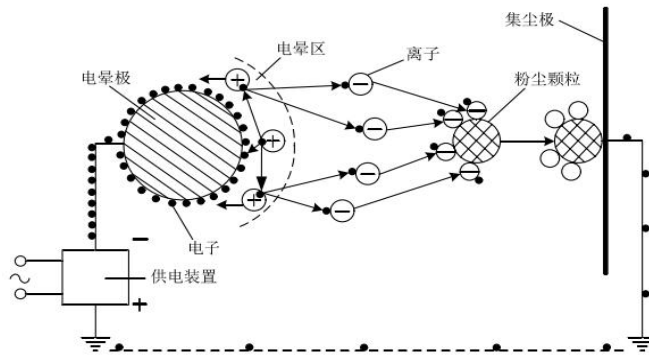


图 1.1 静电除尘基本原理图

由于在没有任何附加条件下，空气不导电，但是空气粒子周围吸附有自由电子时，会产生带有负电的离子，因而具备导电能力，极板间产生的非均匀电场中，整个极板间充斥着移动的自由电子以及负离子。在工业烟气从除尘器入口管道进入后，烟气分子和运动中的自由电子和负离子发生接触，这样就形成了带有负电的烟气颗粒。粉尘粒子带电，这是最基本的环节，要让粉尘粒子多多带上电，由科学理论知识以及以往工业经验说明，电晕放电使用单极性放电即可，不仅会使得烟气颗粒带电较多，而且能产生较高的除尘效率。烟气粒子带电以后，通过强大的电场，带电粒子会向与自己极性不同的极板移动，荷负电的烟气颗粒吸附到集尘极，带有正电荷的灰尘颗粒被吸附在电晕极之上，然而因为荷正电的烟气颗粒与电晕极距离很近，与正电离子发生碰撞的几率微乎其微，因此电晕极上沉积的粒子并不多。在吸附到集尘极那一端的灰尘收集到设定的量时，就采用机械将集尘极上吸附的灰尘以振打的方式把吸附的灰尘清理即可，最后经灰尘排出口排出^[22]。

现代工业中大多以负电作为电晕极，电晕区会有不多的带有正电荷的烟尘聚集，但区外会有很多带有负电荷的灰尘粒子会移动至集尘极，这样以达到集尘效果。从电晕的实际应用角度分析，用负电极作为电晕极的原因有以下几个：（1）负电晕电晕区比较小，放电集中；（2）电场中，自由电子运动速度要比正离子大得多，自由电子作用下除尘效率相对较高；（3）负电晕比正电晕较易避免产生极板击穿的现象，对系统不利。然而负电晕作用下容易产生臭氧，因此在与人体活动接触较为频繁的场合适于用正电晕做电极^[23]。

因为电源部分是静电除尘设备中的核心部分，静电除尘设备需要高压直流电，因此本文的总体设计思路为：首先根据理论基础建立电源系统的总体结构，其中包含有三相整流部分、IGBT（绝缘栅双极型晶闸管）全桥逆变部分、高频变压器部分、高压整流滤波部分，这里采用 IGBT 软开关技术，将电信号高频化，以此为基础，根据 PWM 波形调制原理，通过控制电压控制临界火化率，以稳定输出为前提对系统参数进行设计，根据结构使用 MATLAB 软件建立电源主回路模型，利用 MATLAB 进行仿真。通过理论知识与对仿真波形的结合，使电源输出达到预期的效果。

静电除尘器的负载具有特殊性，由极板以及极板间的灰尘颗粒组成，这样的负载极易受到灰尘性质的影响，对于静电除尘器这种特殊的负载特性其电源应具备以下能力^[24]：（1）静电除尘器电源系统具备高压输出的能力，具有这样的能力是使得电晕放电正常工作的基本前提。（2）静电除尘器电源应具备抗频繁短路的优势并具有可靠性，该能力能够防止极板击穿时产生的火花以及电弧对静电除尘电源装置的损害。（3）静电除尘器电源系统还应具备脉冲供电以及间断供电的能力，脉冲供电和间断供电可以有力地阻止反电晕现象的发生使系统保持稳定运行。（4）静电除尘器电源系统也应具有随时调整输出电压以及输出电流的动态响应特性以提高静电除尘器的工作效率，更是达到降低设备损耗的要求。

1.2 静电除尘器的电特性

1.2.1 静电除尘器的放电程度

静电除尘器工作过程中，极板间运动的自由电子和负离子会对电晕电流产生主要影响，但是它们的迁移率也会和气体的性质有关，因而不一样粉尘性质会具备不一样的放电程度，现象分为多种其中包括有电晕放电、闪络放电以及电弧放电等不同现象。

电晕放电，就是在没有外加条件下，单纯在放射性或者紫外线各种自然条件下空气分子自身存在被电离的分子和自由电子^[25]。当气体分子在加电压作用下，弥散在空气里移动的自由电子就把电子从空气原子上撞击出来，致使包裹在导线周围的气体分子产生电离现象。当电压升高后，空气分子电离的程度会随之变得剧烈，由非自持放电变成自持放电，闪耀着淡蓝色并不刺眼的光并且伴有滋滋声音，像在这样的外加条件下的大气分子放电现象即为电晕放电现象。一般情况下，电晕放电的时间比较短，不会导致电压明显下降和电流明显上升的情况发生，电晕放电不仅对电极无损，并且还能对大气分子的电离和烟气颗粒的带电状况有很大的用处，该现象作为静电除尘器工作的前期准备。

闪络放电，发生在电晕放电之后，如果电压升高到某一值后，就会发生电压大幅度降低以及电流急升的现象，并且会发生明亮的闪光，该现象即为闪络放电。闪络放电发生集中的地方极易对极板造成严重损坏^[26]。

电弧放电，闪络放电发生以后，电压如果持续升高，极板则会发生击穿现象，这样就会形成放电通道，电源装置就会以发生闪络时形成的电弧作为放电通道持续放电，该现象即为电弧放电现象，其引发的后果很严重必须及时给予处理，现象为发出刺眼的光和爆鸣，倘若在发生电弧放电的时候不迅速将电源断开，并给予处理的话，静电除尘器的极板将被烧毁^[27]。

1.2.2 与除尘效率相关因素

静电除尘器处于工作状态的时候，烟气颗粒和静电除尘器的两个极板可以看做是整个除尘系统中的负载，因此静电除尘器的负载电特性受到除尘器中极板的大小形状以及两个极板间的距离，更重要的是灰尘粒子的成分以及所处环境温度的高低也对静电除尘器的负载特性产生影响。在除尘极没有灰尘的时候，输出电流会随着输出电压的高升而增大，当静电除尘器的两个极板间电场发生击穿现象时，电压将停止增加。如果集尘极有灰尘聚集的话，灰尘层间就会由于灰尘产生电压降，在刚开始通电的过程中，输出电压上升的速度比较快输出电流反而以一个比较缓慢的速率上升，静电除尘器的输出电压要求比较高，一半都为几十千伏到几百千伏，在不超过限定值的前提下，必须增大电压值来使静电除尘器的工作效率达到最高。引起静电除尘器的集尘作用的是起实质性作用的去掉灰尘产生电压降之后剩余的输出电压。

(1) 供电电压与除尘效率的关系

除尘器的性能好坏与其除尘效率有着莫不可分的关系。所谓的除尘效率，描述了除尘器集尘极吸附的灰尘颗粒和通入到除尘器中的灰尘颗粒的比值。最早是由德国科学家多依奇（Deutsch）创立的闻名世界的多依奇除尘效率方程式^[28~30]，该式子阐明了除尘效率和除尘器的集尘极的极板面积、空气分子的流量以及烟气颗粒的驱进速度这几个因素间存在的固定关系，揭示了与除尘器除尘效率有关的因素，从而可以推断出加大静电除尘器除尘效率的方式，现代工业中大力推广多依奇效率方程式，在对除尘器的工作状态的分析以及设计研究中得以普遍使用。该公式为：

$$\eta = 1 - e^{-\frac{A}{Q} \omega} \quad (\text{式 1.1})$$

其中 A —集尘极极板面积

Q —气体流量

ω —带电的烟气颗粒在极板电场间的驱进速度

在式 1.1 中，静电除尘器的集尘极的极板面积 A 、气体流量 Q 取决于除尘器自身构造，这两个参数通常情况下是恒定不变的，所以，驱进速度 ω 是影响除尘效率的关键因素。

如果设烟尘颗粒在饱和的状态下的总的带电量为 q ， E_f 为除尘器中电晕极附近的电场强度。

$$q \propto E_f \quad (\text{式 1.2})$$

由物理学理论可以得出，静电除尘器极板间的电场中烟气颗粒作横向运动的过程中所受到的空气阻力表达式为：

$$P = 3\pi\mu d_c \omega \quad (\text{式 1.3})$$

其中 μ —气体的粘度

d_c —尘粒的直径

ω —尘粒与气流在横向的相对运动速度

在烟气颗粒上的电场力与其运动时所受到的空气阻力的值一样的时候，烟气颗粒上所受到的外力之和就为零，烟气颗粒在受力方向上的加速度为零，这时烟尘颗粒在横向的方向上做加速度为零的匀速运动，烟尘颗粒此时的运动速度即叫做驱进速度：

$$\omega = \frac{qE_j}{3\pi\mu d_c} \quad (\text{式 1.4})$$

$$\text{假定 } E_f = E_j = U / B = E_p \quad (\text{式 1.5})$$

其中 U —电除尘器的工作电压

B —电晕极到集尘极的距离

E_p —除尘器的平均电场强度

通过（式 1.4）可以得出，在烟尘颗粒的大小及其粒子特性相对不变的条件下，烟尘粒子的驱进速度 ω 只与静电除尘器集尘极的电场强度 E_j 以及烟尘颗粒总体的带电量 q 有密切的关系，再通过（式 1.5）可以得出 $\omega \propto E_p^2$ 。通过物理电磁理论可以得出除尘器的平均电场强度 E_p 与除尘器的电晕极产生的负高压 U 有直接关系^[3]，要想使平均电场的强度加大，必须加大供电电压的值，由于烟气颗粒的趋进速度和电场强度成正比关系，因此可以通过增加供电电压的值来增大灰尘颗粒的驱进速度，因此便使得静电除尘器的除尘效率增加。

此外，可以得知，烟气颗粒的带电量 q 和除尘器的电晕放电产生的电流有着紧密的关系，要想使烟气颗粒的带电量增大，就可以通过增加电晕电流的值来达到要求。这样增加了烟气颗粒的带电量 q ，灰尘颗粒的驱进速度 ω 也将随之增加，因此静电除尘器的除尘效率也将大幅度提升。所以，通过驱进速度的公式可以得出，要想提升静电除尘器的除尘效率，可以通过两个因素增加除尘器的除尘效率，一是通过增加除尘器极板间产生的平均电压，一个是加大除尘器极板间产生的电晕电流，通过改变这两个关键因素，可以大大提升静电除尘器的除尘效率以及工作性能。

（2）供电电压波形与除尘效率的关系

静电除尘器的供电电压之所以为负高压，原因在于同等条件的情况下，负高压供电方式比正高压供电的方式产生的电晕电压很小，但是电晕功率却很大，并且发生击穿现象的时候击穿电压的值很低以及动态响应好。但是静电除尘器的电源系统供电电压的波形形状也会和静电除尘器的除尘效率有关。图为几种常见的供电电压波形。

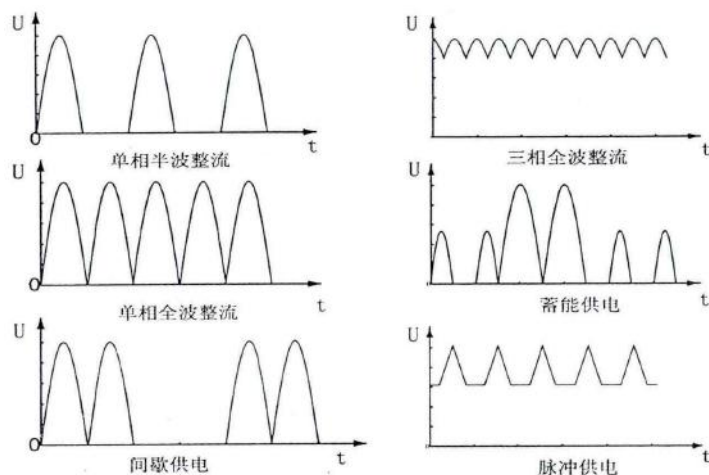


图 1.2 常见的供电电压波形

为选取合适的电压输出波形，应根据粉尘的特性和烟气的性质来判断，因为平均电压有利于粉尘的捕集，峰值电压有利于粉尘的荷电，应该根据不同的场所选择合适的供

电电压。例如在灰尘粒子较小、低比电阻场所，根据这些灰尘颗粒比较容易带电却不容易捕集的特性，选择电压波形为平均电压较高、峰值电压较小供电电压，比如常见的单相、三相全波整流供电方式；在粉尘颗粒特性比较中性没有特殊性质的除尘场所，即粒子既易于带电也易于收集的场所，则可以选择单相全波整流供电方式、蓄能供电方式，这两种供电方式具有平均峰值电压比较适中，峰值电压也比较适中的特点；在烟气粒子吸湿性比较强以及高比电阻的场所，根据这类粒子的不易带电又易发生反电晕现象的特性，可以采用半波整流供电方式、脉冲供电方式以及间歇供电方式，这几类供电方式都具有峰值电压较高、平均电压又较低的特点^[32-35]。总之，要利用不同烟气颗粒的不同特性及运行场所，选择适合其的供电方式，这样才能保证供电系统的稳定运行。

1.3 国内外发展现状

静电除尘技术是继长远历史以来一项新兴的发展技术，本质看似简单实则繁复的一项现代工业技术，静电除尘器的静电吸引原理是现代静电除尘技术的理论基础。对于现代工业中的静电除尘电源装置来看，最多的还是专注在关于静电除尘器电源装置的改良以及技术改革的问题，例如对电源装置的控制系统的探索，发生闪络的判断方式等问题。现代工业中很多仍然采用的是工频下工作的静电除尘供电电源。

关于静电除尘器，值得一提的是来自德国的霍菲尔德在 1824 年的时候生产的第一台有关静电除尘的模拟设备。来自美国加利福尼亚大学的化学教授科特雷尔（F.G Cottrel）在 二十世纪初期第一次将静电除尘技术成功地应用到机械设备生产中^[36]，并在接下来的十年间将静电除尘技术成功地推广到水泥行业中，利用静电除尘器将制造水泥的时候产生的工业烟尘颗粒收集在一起。在水泥生产过程中使用的静电除尘器是使用一根细导线作为除尘器的放电电极，输出电压高达 45kV，为静电除尘器步入工业发展奠定了创世纪的基础。因而，静电除尘器正式步入了工业生产当中，成为工业生产中收集灰尘的主要设备之一，因此有了板线式“科特雷尔静电除尘器”。静电除尘器开始被应用于各种工业灰尘污染治理中并得到迅速的推广^[37]。到了 20 世纪 60 年代已遍及电力、水泥、采矿、冶金、有色、炼油、建材、造纸和化工等各个行业领域^[38]，为全球的环保事业做出了巨大的贡献。

由于工业生产中实践经验不断地积累，静电除尘器的电源装置已经日趋完善。1911 年来自美国的斯特朗（W.W.Strong）首先对有关静电除尘器的理论知识进行研究与分析，此举奠定了静电除尘理论的初步基础，为后人开创了静电除尘器的先河^[39]。著名的

静电除尘器效率方程的创始人多依奇（Deutch）最初是以安德森（Anderson）做的有关静电除尘的现场试验总结的静电除尘的电特性为理论依据加以深入研究。1950 年，怀特（H.J.White）通过概率的理论知识对出多依奇公式做出了新的推导和演示，此方法是考虑理想条件下实现的，怀特推到的有关效率方程式发展为静电除尘器效率计算的初级方式成，成为目前静电除尘技术的研究依据，为静电除尘器的深入研究奠定了坚实的基础。紧接着一年里，怀特（H.J.white）还推导了准确的粒子扩散的过程中荷电公式^[40]。他（H.J.white）以及波德尼尔（Pauthenier）在不同年间先后出版了关于除尘器在捕集烟尘颗粒性质为高比电阻的灰尘过程中，反电晕现象对静电除尘会产生什么样的影响探索的刊物。二十世纪二十年代，罗曼（Rohman）确立了有关静电除尘器的高压电场中烟尘颗粒带电的理论知识。以可奇（Gooch）为代表的一些科学家通过奥格尔斯比以及尼科尔斯研究的有关静电除尘器的数学模型的研究对其作出了纠正以及改善。紧接着 Leonard 以及一些热衷于科学事业的研究人员在二十世纪八十年代通过对以往理论知识的研究也建立出有关静电除尘器的“静电传输—紊流扩散”的静电除尘器的数学模型^[41]。法国的阿尔斯通公司、丹麦的 FLS Industries、美国的纽维尔公司以及领先于世界工业的一些企业，早在二十世纪八十年代末期就已经着手于对静电除尘这项技艺的研究^[42]。尤其以 Alstom 公司的技术最为领先。

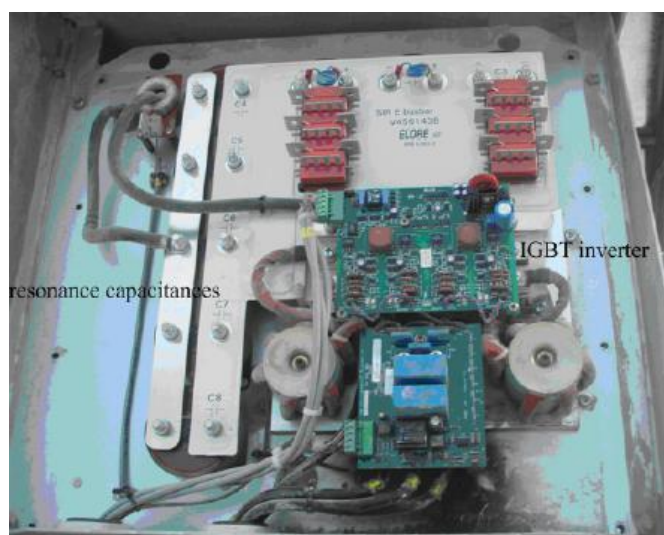


图 1.3 法国的阿尔斯通公司除尘器中供电系统照片

我国静电除尘技艺起步点较低相比国外的除尘技术要迟数十年，静电除尘这项技术在 1950 年开始才逐步传入到我国的工业生产当中^[43]。建国前，由于我国的工业比较落后，全国总共只有几台结构陈旧，性能也非常差的静电除尘器。

静电除尘技术相继在工业应用、冶金工业、电力工业方面投运成功，慢慢推广开来，得到很好的发展前景。在 1965 年，原冶金部组织本行业几个院所（武汉安技所、北京有色院、鞍山矿山院等）在包头钢铁公司有计划、有组织地开展静电除尘器的试验研究，设计出 2 台静电除尘器为中国静电除尘试验开创了先河^[44]。

静电除尘这项备受关注的技术得到高速发展，虽然我国的除尘技艺起步平台较低，但是我国的技术基础与除尘设备这些装备水平通过人们的不断努力都跃上一个新台阶。我国在静电除尘器的基础理论试验探索与发掘的方面也获得了长足的发展，时至今日，静电除尘方式已成为世界各国在治理大气污染和保护生态环境中应用最为广泛、最为重要的除尘设备。静电除尘器经过半个多世纪的历史进程和中国好多热衷于静电除尘技术的技术研究人员的坚持不懈，我国的静电除尘技术和设备与国外先进技术和设备水准相当。在当今工业生产中，中国的可控硅高压电源已全面实行自动化控制，利用微机控制判断闪络发生、对输出电压和电流的准确程度以及对闪络进行处理的方式各个阶段，这些设备装置以及控制系统的技艺都已经够得世界除尘水平的高端行列，尤其对于闪络的检查判定以及对闪络进行处理保证系统稳定这些地方更是具有展新的探究和重大进展。在我国，目前总共有价值上千亿元的静电除尘器设备运行在电力、水泥、采矿、冶金、有色、炼油、建材、造纸和化工等行业。

在最近几年中，我国的静除尘器的总产值一直处于上升阶段，2005 年静电除尘器的总产值为 140.01 亿元，直到 2008 年总产值已经加大到 289.99 亿元，年均增长率更是一个客观的数据，已达到 26.88%^[45]。二十一世纪初期，我国受到了世界金融危机的冲击，水泥行业、钢铁行业、有色金属行业以及机械等行业发展增速大幅度回落，很多企业的除尘器产值下降严重，因此致使我国的除尘行业的总产值在小段时间内发生了不稳定的波动有些许降低。紧接的两年里，我国通过宏观调控及政府干预，除尘行业的总产值波动逐渐稳定并有缓慢上升的趋势。虽然在 2012 年除尘行业的总产值因为些许比较落后企业的原因有一些微小的下降趋势，但是总体来看我国的除尘行业总产值依旧趋于稳定。我国作为一个经济高速发展的发展中国家，目前的能源结构仍然是以燃煤发电为主，据测算，到 2020 年，燃煤产电总量仍达到我国总的产电总量大约 70%，在未来能源领域中火电位居主力地位不会动摇。随着我国经济的高速发展，对能源和原材料的需求量有增无减，各个行业对电除尘器仍有巨大的需求。我国工业生产中早已有很多企业开始使用静电除尘器，并研发出了高频逆变电源装置，例如国测科技股份有限公司和福

建的龙净环保股份有限公司均具有本公司生产的除尘器设备，其中福建的这家企业生产的静电除尘器电源系统已生产出了成套的电源设备。



图 1.4 国投某一企业的静电除尘器整套设备的照片

静电除尘这项技艺距起步以来到发展成熟中间仅仅经历了数百年的历程，静电除尘这项技艺仍是一门很具有青春活力的学科，值得我们去探索和研究。虽然在静电除尘器的进程当中依然有着理论研究滞后于实际应用、高压供电方式达不到节能环保的目的以及高比阻性质的烟气颗粒的捕集难题等多种问题，又面临着各国大气排放标准日趋严格的要求以及其他种类除尘器的种种挑战，但静电除尘器仍然蕴藏着巨大的潜力值得我们去挖掘利用，每一个人只有按照科学的方法去努力探索、不断创新、坚持不懈，才能使得静电除尘设备得以健康快速的发展，为我国工业进步作出巨大的贡献。

静电除尘器作为我国乃至世界上普遍接受的具备高效率工作的除尘设备，其不但具备耗能低、工作中阻值低，而且具备有维修简单、性能稳定等好处，不管在以前还是当今甚至在未来以后，静电除尘器将致力于电力行业、水泥行业、采矿行业、冶金行业、有色金属生产行业、炼油行业、造纸行业以及化工生产等产业中都是很重要的一种除尘手段，一定会迎来越来越美好的前景和越来越稳定的发展趋势。

1.4 本文主要工作

文章就静电除尘器的供电电源作为探讨的主要对象，分为主电路部分和控制部分。主要工作有：首先通过研究静电除尘器供电电源的总体构造，根据理论分析对供电系统的主电路进行设计与分析，此外对供电电源的主电路各个部分器件参数实行整定以及计算；根据静电除尘器所要求的工作状态以及运行的性能要求，研究出静电除尘器电源装置的整体主回路，并确定控制系统的控制策略，根据除尘器测量值来判断其不同的工

作状态，再根据工作状态设计不同的工作模式，这里根据静电除尘的负载特性制定了合适的控制方式即三段式升压闪络跟踪控制方式，用此方式可以达到发生闪络并给予及时处理以后整个系统快速达到原始运行状态的目的。利用 MATLAB 软件中的 Simulink 仿真工具箱对静电除尘器的供电电源系统进行整体模型的搭建，对 LCC 谐振变换器和移相全桥变换器进行仿真与对比，对仿真波形进行分析，在控制部分选择对移相全桥变换的驱动进行仿真采用 PI 控制器对输出电压和输出电流进行控制，以达到系统稳定的目的，最后仿真出三段式升压闪络跟踪的三线图，这些仿真结果将会为静电除尘器的程序控制过程的深入研究及设计奠定理论基础。

对于静电除尘器来说极板间电压值越大，除尘设备的除尘效率会随之增大，可是如果极板间电压值比临界电压还要大的话，就会发生火花击穿的现象，极板间的电压值就会瞬间减小，进而影响除尘设备的工作效率，所以单纯地加大除尘器两个极板之间的电压值其实不能达到提高除尘设备工作效率的目的，然而假如能将除尘器的输出电压值保持在一个稳定值的附近即将发生火花击穿的临界状态值，不仅能够将除尘效率得以提升也为整个系统的运行减小了能量损耗。除尘器电源系统的控制部分首先要对火花击穿极板的条件进行判定，当极板被击穿以后，应该及时对闪络进行处理并对逆变桥的驱动信号进行改变进而改变输出电压。通过理论知识和电源主电路仿真的结合，使电源输出达到预期的效果。

整个电源装置要工作在一个能够保持除尘器高效率的电压值，这个值要尽可能靠近发生火花击穿瞬间的那个电压值，这样才能够使除尘设备保持一个较高的效率，根据闪络跟踪原理，应该以发生闪络的时候的那个临界电压作为参考值，通过改变 PWM 驱动波形的占空比，用这种方法将输出电压和输出电流作为负反馈改变输出电压的值以使系统稳定运行，对移相全桥变换器进行双闭环控制，以稳定输出电压为控制的最终目的。但是在静电除尘器的工业运行当中，如果闪络现象被错误检测的话将会导致极板间的电压比实际值较小，这样将会导致整个除尘器的除尘效率变小；如果闪络现象被漏检的话很容易造成极板间电场被击穿产生电弧，不仅会削弱除尘设备的工作效率又容易损坏器件，由以上两个影响因素可以得出，对于静电除尘器供电电源的控制部分首要任务即要对闪络信号进行精确判定，既不误检也不漏检。最后通过对移项全桥变换器仿真，调节 IGBT 逆变桥的 PWM 驱动，改变输出电压以提高系统的动态响应，仿真出控制策略中三段式火花跟踪控制，跟踪输出电压以及输出电流的值确定会发生闪络的电压以及电流值，控制输出使系统在保证稳定运行的条件下提高除尘设备的工作效率。

2 静电除尘电源主电路

2.1 高压静电除尘电源分类

2.1.1 单相可控硅供电电源

静电除尘技术比较传统并且比较成熟的供电电源是通过使用晶闸管移相控制直流电源，这种电源技术的使用已经非常成熟，交流调压电路采用两个反并联的晶闸管来调节变压器原边侧的输入电压，然后再通过升压变压器进行升压操作和二极管组成的整流硅堆后得到的负电压（此值为负）并将此电压供给除尘设备的两个极板两端正负极。这种供电方式结构和控制都比较简单，应用中低比阻粉尘的场合中会有较高的除尘效率，当极板间产生火花击穿现象的时候，如果相电压过零的话即能够切断晶闸管的触发信号。但是这种供电方式的功率因数很低，不能达到节能环保的要求，除尘效率也达不到理想的要求。

2.1.2 三相可控硅供电电源

和单相电源不同的是，三相电源电路是以三相交流电作为输入的，并且功率因数也会有所改善，其工作原理是是将三相低压交流电通过三对反并联可控硅移相调压，将产生的电压信号通过升压变压器进行升压操作，然后利用高压整流桥的整流作用可以输出较为稳定的值为负的输出高压加到静电除尘设备极板两端正负极，三相工频电源比单相电源更容易控制，但是这种供电方式的变压器和滤波器的体积要求比较大，成本比较高，在一些高比电阻的场合中并不适用。

2.1.3 高频 IGBT 逆变电源

静电除尘器还有一种新型的供电方式，即高频 IGBT 逆变供电方式。随着现代电力电子技术的发展，很多高频大功率电子器件被应用到工业中，它们的出现为静电除尘器的新型电源的发展提供了很可靠的保证。

静电除尘器这种新兴的供电方式主要是通过全控型器件 IGBT 逆变桥电路来实现的，三相交流电先通过三相不控整流二极管之后变成直流电输往全桥逆变器中，然后方波经过电感滤波经过升压变压器进行升压操作，最后变压器二次侧的负高压经过整流硅堆产生负高压直流电供电给静电除尘设备。这种供电方式，不仅减小了变压器的体积、

减少成本，而且没有缺相损耗，输出的电压波形很小，平均电压高，相对于传统的供电方式，不仅能够灵活控制，提高除尘效率，动态性能很好，并且很节能环保。其电路图如下图所示。

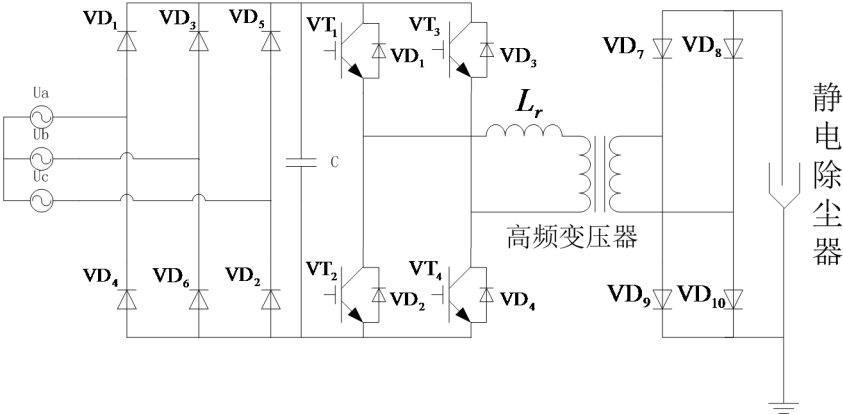


图 2.1 静电除尘器新兴的供电方式拓扑图

对于以上三种供电电源，这里给出对比。如表 2.1 所示。

表 2.1 常见的静电除尘器电源对比

电源类型	优点	缺点
单相可控硅电源	应用普遍，系统运行具有可靠性并且延续性佳，对变压器的要求比较小	装置所需变压器成本高，对环境的适应能力差
三相可控硅电源	技术成熟，电压输出较稳定，控制电压能力强	适应性差，控制不及时
高频 IGBT 逆变电源	变压器体积很小，工作既高效又减小能耗	成本较大，系统稳定性较差

2.2 高频变压器

2.2.1 高频变压器特性分析

静电除尘设备的电源控制系统中所用变压器乃是整个系统中最核心的模块，变压器的作用不仅可以作升压来使用，也能够输送能量以及起到安全隔离的作用，并且对整个系统的稳定性运作起到不可忽略的作用。当工作频率比较小的时候，变压器的漏感是要被列入关键参数进行研究与分析的，由于寄生电容的影响不大因此它可被忽略不计^[1~3]。当工作频率比较大的时候，输出为高压时变压器需要适当的绝缘距离，所以变压器的一次侧及变压器磁芯材料之间、一次侧及二次侧之间还有二次侧的各个绕组线包之间都应该留有一定的绝缘间隙；为了得到输出高压，需要大的匝比，致使二次侧绕组的匝数和层数较多，折算到原边的分布电容就很大，就会产生副边绕组流过无效电流以及

变压器工作效率降低的现象。这两方面的原因都会使变压器产生较大的附加参数即分布电容以及漏感。分布电容和漏感出现以后会对变压器产生不可估量的影响，变压器二次侧绕组间产生的分布电容会导致电流尖峰和延缓输出电压上升的速率；变压器中存在的漏感则会产生电压尖峰，甚至损坏电路中的开关器件的概率很大导致不必要的损失。变压器二次侧绕组间存在的分布电容和漏感这两个因素会对变压器的工作特性造成显著的副作用，因此受到普遍关注。通过对高频变压器内部参数的分析可以得到其等效模型如下图所示。

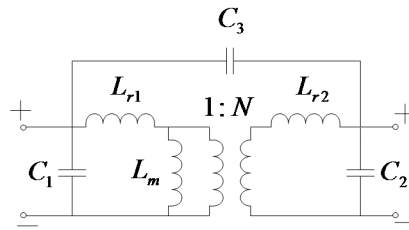


图 2.2 高频变压器等效模型

图中 L_{r1} 是变压器一次侧漏感、 L_{r2} 是等效到变压器一次侧的二次侧漏感、 L_m 是励磁电感， C_1 、 C_2 、 C_3 均是变压器一次侧和二次侧的分布电容以及一次侧和二次侧中间存在的耦合电容。

因为输出功率较大的变压器一般使用的是磁导率比较高的铁磁材料当做其原副边之间的磁芯，这样就可以使得变压器体积大大减小以及使漏感影响减弱，因而变压器一次侧的绕组匝数变小，这样一来一次侧存在的分布电容即被忽视也不会产生很大的影响。为了减弱变压器一次侧与二次侧之间存在的耦合电容可以采用增加屏蔽绕组的方式，这样就会大幅度降低耦合电容的值，这样一来一次侧与二次侧之间存在的耦合电容即被忽视也不会产生很大的影响。除了这两个因素，变压器中仍存在励磁电感，虽然其值比较大，但是通过它的电流却微乎其微，它产生的影响即使被忽视也不会对系统造成太大的负面作用。通过对变压器中各种参数的分析以及忽略它们对变压器特性的影响，可以得到变压器的简化等效模型，见图 2.3，其中 C_r 是从二次侧折算至一次侧的分布电容， L_r 是变压器一次侧漏感以及二次侧漏感等效到一次侧的总漏感， $L_r = L_{r1} + L_{r2}$ 。

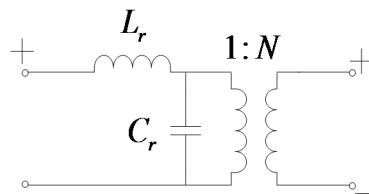


图 2.3 变压器简化等效电路拓扑图

从电路中能够看出,分布电容不容忽视其会对电路会产生一定影响,如果要降低电路中输出的能量消耗在分布电容上的话,则能够使用在支路中并联一个电感的办法即可以消除影响。在电子技术应用的理论知识当中,当发生串联谐振的时候,可以看作是发生了短路;当发生并联谐振的时候,相当于开路。所以可以通过采用并联电感的方式来消除分布电容的影响,电感的位置应在变压器的一次侧,其与变压器的分布电容构成了并联谐振,利用其可以看作为开路的特点,以达到降低分布电容影响的效果。

2.2.2 负载模型

在静电除尘系统中,一般使静电除尘器这个负载等效成一个可变电阻 R 和一个容值一定的电容 C 并联在一起的形式,如图 2.4 所示。

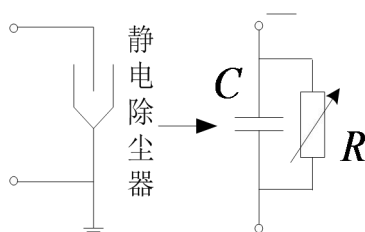


图 2.4 静电除尘器负载的等效电路拓扑图

其中可变电阻 R 是电晕电流等效电阻,这个电阻会因烟气颗粒的浓度、粒子体积、灰尘性质及化学组成、粒子温度、粒子的粘性 & 吸湿性等因素的不同而不同,同时也与静电除尘器本体的类型、结构、大小等有,甚至与风速也有关系,其变化范围一般在 $20\text{k}\Omega \sim 10\text{M}\Omega$ 之间。当等效的可变电阻 R 较小的时候,因为电晕电流骤增的原因,则会产生极板间电场发生击穿的现象,称之为闪络放电。负载中的电容 C 是除尘器中两个具有一定间隔的电极的等效电容,通常它的值比较固定,其值会因两个极板的距离、极板大小以及其间的烟气颗粒的不同而变化,变化范围比较固定在 $4000\text{pF} \sim 120000\text{pF}$ 之间。

静电除尘器电源负载特性复杂且具有特殊性,具体表现如下:

(1) 静电除尘器正常工作的状态下,两个极板间会无法规避地产生闪光甚至产生电弧,所以仅仅只可减少电弧出现的次数但是却无法完全清除这一现象。

(2) 在灰尘颗粒的体积比较小并且比电阻很高的时候,静电除尘器就会很容易产生反电晕现象。

(3) 进入除尘器的灰尘颗粒的一些物理特性，会对除尘设备的正常工作产生很多无法确定的因素，因此除尘设备具有的负载特性比较繁复并且具有不唯一性。

2.3 软开关变换器

2.3.1 软开关技术的应用

静电除尘器中的 IGBT 逆变桥和高压整流桥为供电设备最为主要的功率变换阶段，把直流电通过逆变桥成交流电，再将经过整流的交流电输送往变压器中，然后将输出的高压交流电在经过整流硅堆得到直流负高压，紧接着再输送至极板两端。静电除尘器的电源装置要具有体积小、工作效率高的特性，因此功率变换环节开关管工作方式需要与变压器的寄生参数相结合。近年来工业发展中，电源装置经历了 PWM 变换技术、谐振变换技术、准谐振变换技术、多谐振变换技术和软开关变换技术发展过程，其中 PWM 变换技术是推广迅速、发展稳定的一项方式，但因它是硬开关变换技术，在工作频率较大电流较大的情况下，传输功率将变大，这样就会导致噪声以及损耗的产生，甚至会损坏电子器件，然而，改变 PWM 变换器里元件工作开关的条件提供了消除该影响的普遍方式。1980 年，来自美国著名大学的大卫博士就谐振直流环节逆变这一问题发表了著名言论，这一言论为软开关开辟了新纪元。

软开关技术是指开关管具备在零电压的条件下导通，也可以说在零电流的条件下截止。软开关技术是采用谐振变换理论依据，将通过开关管的电压或电流依据正弦或准正弦波动趋势波动。要想降低开关损耗，必须使得电压（或电流）在自然条件下经过零点让开关处于截止状态。当逆变技术刚刚起步的时候，开关器件为无法自动截止的可控硅，因此必须利用谐振变换在可控硅导通后设置反向电压使得器件关断。RLC 谐振变换能够产生零电压或零电流关断，为非常普遍的软开关变换器。

具有自动关断能力的全控型电子元件在当代逆变器中得到大力推广，RLC 谐振变换为大多企业所使用。RLC 谐振的开关器件导通电流以及截至电压要高于电路设定值，因此开关器件需要额定值较大的元件，同时该技术是通过改变频率来调制整个电路的。

软开关技术通常包括有：

(1) 谐振型变换器 (Resonant converters)。根据电子元件谐振模式，谐振变换器包括串联谐振 (SRC)、并联谐振 (PRC) 和串并联谐振 (SPRC)。正常工作的情况下，谐振器件以不同形式加入到谐振当中，涉及电路中的能量变换。这种谐振方式容易受到负载的影响，通过调节频率实现。三种谐振方式对比如下表所示。

表 2.2 三种谐振方式对比

谐振变换器类型	优点	缺点
SRC	谐振电容可以隔直，恒流	硬关断，负载调整能力差
PRC	恒压性质，稳定电压能力强	硬截止，短路能力差
SPRC	具备 SRC 及 PRC 共同优点	过程繁复不简便

(2) 零转换 PWM 变换器 (Zero transition PWM converters) 可分为零电流 PWM 变换器 (ZCT PWM) 和 零电压 PWM 变换器 (ZTV PWM)。该技术具备在脉宽调制的工作条件下，采用并联辅助电感，只在开关截止的时候起作用来达到软开关的目的，开关导通时不起作用以达到降低损耗的作用。

(3) 零开关 PWM 变换器 (Zero-Switching PWM converters) 可分为零电流开关 PWM 变换器 (Zero-current-switching PWM converters) 和零电压开关 PWM 变换器 (Zero-voltage-switching PWM converters)。该技术以准谐振技术为依据，使得频率不变。但是其和准谐振技术不一样的地方在于，该技术采用固定开关频率脉宽调制控制，并且器件工作周期小。它一般为开关周期的 1/10~1/5。

2.3.2 LCC 谐振变换器

LCC 串并联谐振技术实质是把变压器中参数分布电容当做谐振器件，采用这种结构，就没有必要将变压器复杂化分析。根据变压器的简化模型可以得出，SRC 能够简化成 LCC 变换器，该简化模型的等效电路见下图。

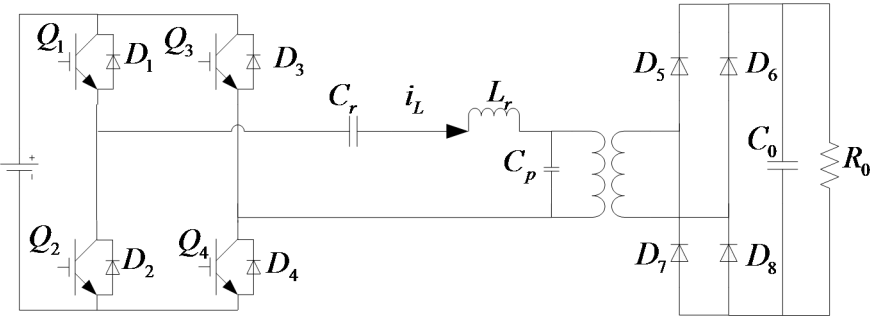


图 2.5 LCC 串并联谐振电路图

图 2.5 中， $Q_1 \sim Q_4$ 是开关器件， $D_1 \sim D_4$ 是每个开关器件并联的反向二极管， C_r 是谐振电容， L_r 是变压器总漏感作为谐振电感， C_p 是变压器一次侧的分布电容，

$D_5 \sim D_8$ 组成了整流桥， C_0 与 R_0 并联是负载的等效模型， i_L 是流经 L_r 的电流。以 f_s 以及 f_r 之间的联系为基础，LCC 谐振变换器将有以下的工作模式。

(1) 模式 1: $0 < f_s < 1/2 f_r$ 时，不连续导电模式。即开关管零电流导通，变换器是电流断续的，显示电流源特性以及过载保护特性。

(2) 模式 2: $1/2 \leq f_s < f_r$ 时，连续导电模式。即开关管是零电流截止，无法自动导通，变换器是电流连续的，电路为容性，显示恒流源特性以及过载保护特性。

(3) 模式 3: $f_s > f_r$ 时，连续导电模式。即开关管是零电压导通，无法自动截止，变换器是电流连续的，电路为感性，显示过载保护特性。

当变换器工作在模式 1 方式时，开关频率很低，电路中的平均电流低，因此对功率输出没有益处；当变换器工作于模式 2 方式时，逆变桥将受到冲击电流，因此在换流时二极管应具备迅速恢复的特点；当变换器工作于模式 3 方式时，不但逆变桥不会遭受冲击电流，而且没有能量消耗，能量损耗受到功率因数的影响，二极管的选用也不严格，因为这些优点，逆变桥可以可靠地工作于感性模式，在大功率电路中较为实用。

由于 f_s 与 f_r 都比较大，一个周期内静电除尘器的等效负载 C_0 两端的电压波动很小，所以 LCC 谐振在一个运行周期内充电过程可以看作是串联谐振其输出电压恒定在一个工作周期内充电过程，等效电路图如图 2.6 所示。

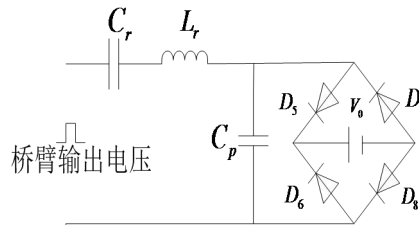


图 2.6 LCC 电路简化模型

谐振回路中输出电压和输出电流的原理图如图 2.7 所示，下面给出稳态时的谐振变换器工作过程分析：

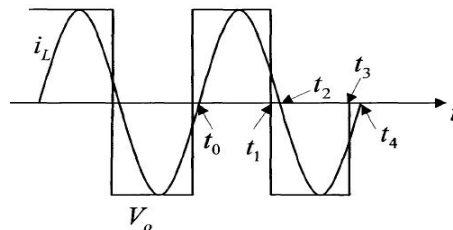


图 2.7 LCC 电路输出电压以及电流的波形

(1) $t_0 \leq t < t_1$ 阶段, 工作模式 1, Q_1Q_4 导通, t_0 时刻 $i_L = 0$, 开始正向增大, $i_L > 0$, 电路见图 2.8; 流经变压器和整流器向 C_0 充电, 当时间为 t_1 , 电路中 $i_L \neq 0$, 等效模型如图 2.9 所示, 当 $i_L = i_0$ 时, Q_1Q_4 关断, i_L 利用 D_2D_4 续流, V_0 方向改变, 电路进入下一工作阶段。

(2) $t_1 \leq t < t_2$ 阶段, 工作模式 2, D_2D_3 处于续流状态, $i_L > 0$, 电路图见图 2.10。 t_2 时刻 $i_L = 0$, Q_2Q_3 导通, V_0 不换向, 电路进入下一工作阶段。

(3) $t_2 \leq t < t_3$ 阶段, 工作模式 3, Q_2Q_3 处于导通状态, 由于 t_2 时刻 $i_L = 0$, 因此电流开始反向, 当 $D_1 \sim D_4$ 截止时, $i_0 = 0$, 等效模型见图 2.11; 当整流二极管开始向 C_0 充电的过程中, $i_0 > 0$, 等效模型见图 2.12, t_3 时刻 $i_L < 0$, Q_2Q_3 硬关断, i_L 利用 D_1D_4 续流, V_0 方向改变, 电路进入下一工作阶段。

(4) $t_3 \leq t < t_4$ 阶段, 工作模式 4, D_1D_4 导通, 处于续流状态, 电路图见图 2.13, 到 t_4 时刻, $i_L = 0$, Q_1Q_3 导通, V_0 保持原来方向, 该模式完成后, 回路开始下一个工作周期。

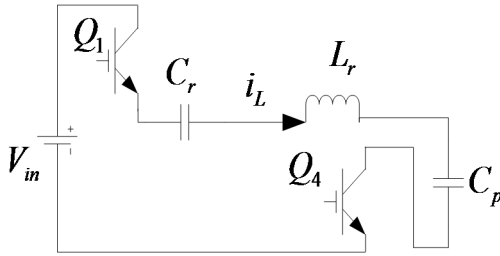


图 2.8 工作模式 1 过程 1

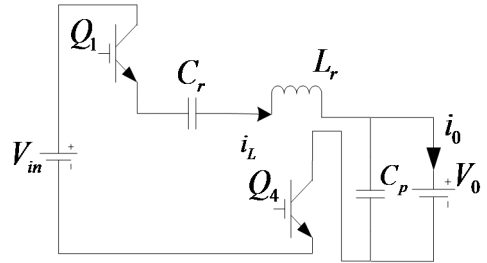


图 2.9 工作模式 1 过程 2

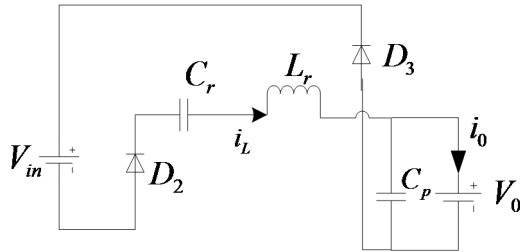


图 2.10 工作模式 2

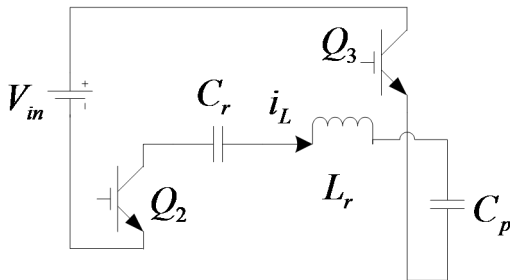


图 2.11 工作模式 3 过程 1

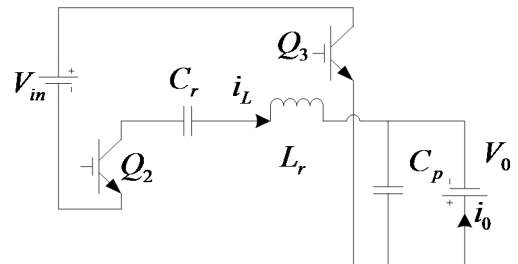


图 2.12 工作模式 3 过程 2

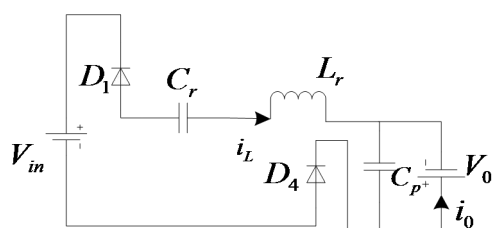


图 2.13 工作模式 4

当满足 $0 < f_s < 1/2f_r$ 条件，即符合软开关技术。LCC 电路各个周期原始条件不断变化，过程计算复杂，因此需要采用 Matlab 软件里的 Simulink 对 LCC 的动态工程建模仿真，采用改变逆变桥 f_s 达到控制输出电压的目的。仿真模型如图 2.14 所示。

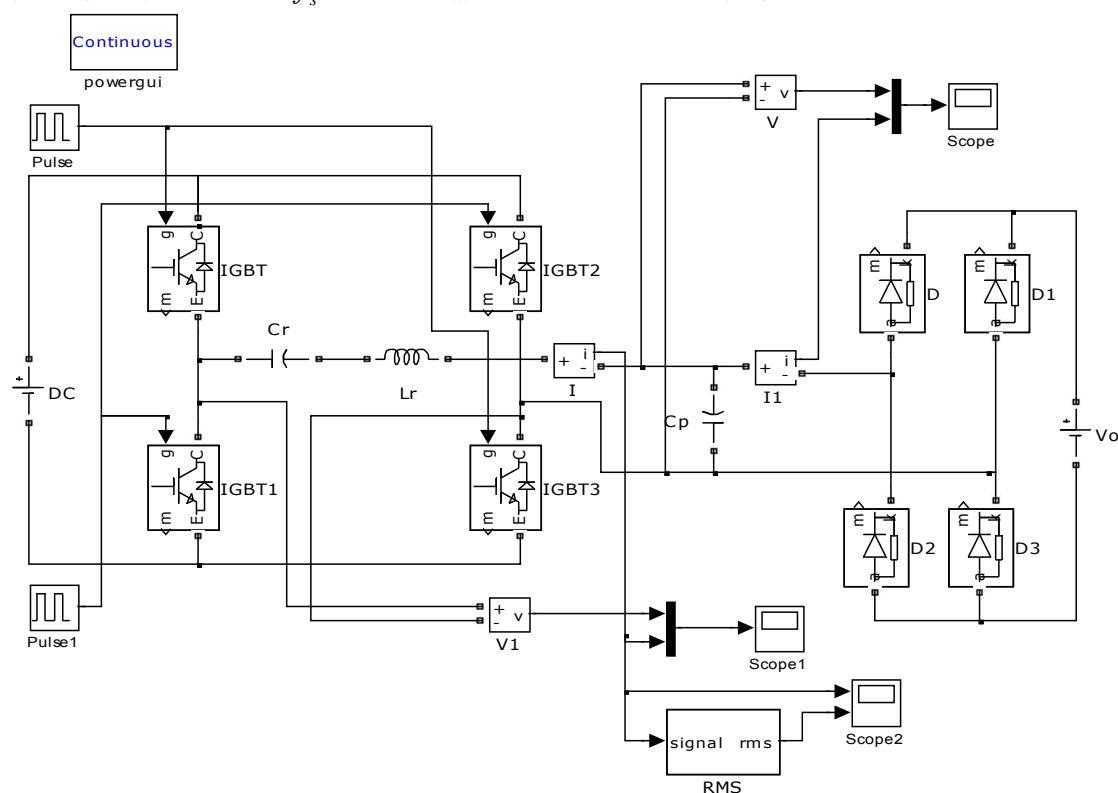


图 2.14 LCC 谐振电路仿真模型

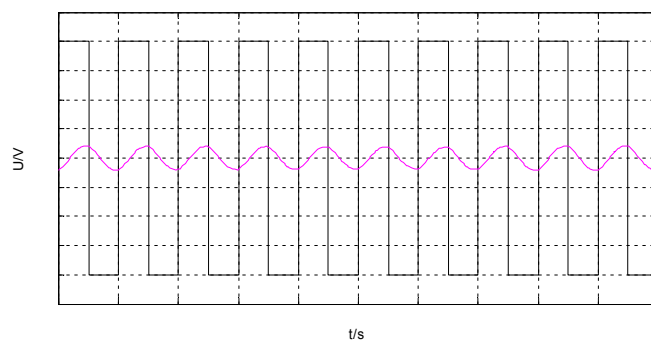


图 2.15 LCC 电路中输出电压和电流图

由上图可以得出，在 $f_s > f_r$ 的条件下，回路中电流滞后电压，从图形中可以看出回路中电流形状基本上接近正弦波。

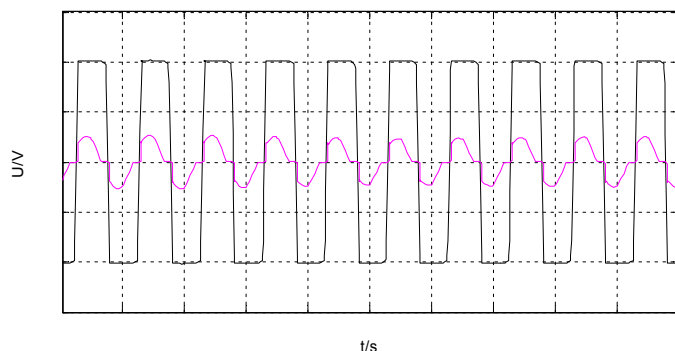


图 2.16 整流桥的输入电压及电流图形

从上图可以看出，输入电压和输入电流两者相位大体相同，整流桥中输入电压大致是方波，当电压反向的时候有时间延迟，电流过零，说明此时整流桥处于截止，谐振回路中的电流给电容 C_p 充电，如果减小 C_p 的值，就可以减小充电的时间，从而减小电压反向延迟时间，这样电压的波形就更加接近方波，电流波形更加接近谐振电流波形。但当 $C_p = 0$ 时，串并联谐振电路就会转换为串联谐振电路，这时整流部分的输入电压和电流将会同相位，功率输出效率也将最高。

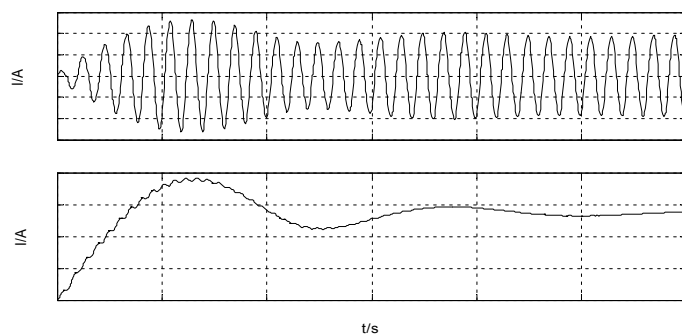


图 2.17 $f_s = 20\text{kHz}$ 时谐振电流波形和其对对应均方根值

图 2.17 为开关频率为 20kHz 时谐振电流的波形和其对应的均方根值。得出结论：经过多个周期，平均电流大体趋于稳定。虽然 LCC 具有电流源特性，但是其输出电压很有限，会产生大的谐振电流峰值以及谐振电压峰值，并且在调试过程中电路中参数选择不容易，整个系统繁琐需要耗费较大的功夫。此外，很多谐振回路采用改变频率的办法改变电路功率，这会加大变压器建设的成本。

2.3.3 ZVS-PWM 移相全桥变换器

在零开关 PWM 变换器分类中有零电压开关 PWM 电路和零电流开关 PWM 电路两种，这里选用零电压开关 PWM 电路，移相全桥变换器的拓扑图见图 2.18。

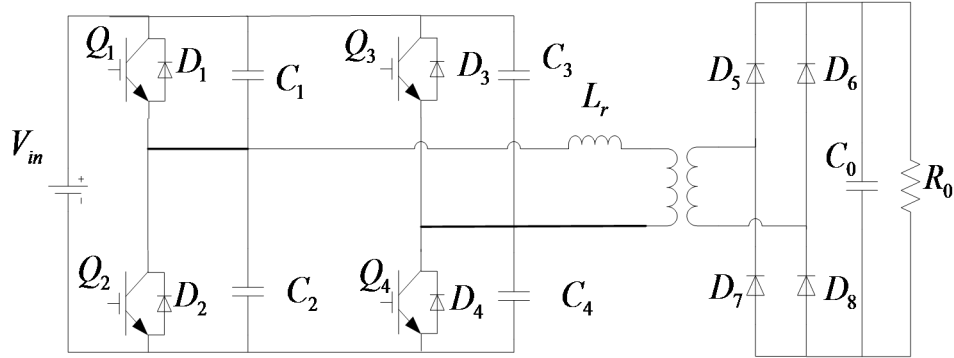


图 2.18 ZVS-PWM 电路图

图 2.18 中， $Q_1 \sim Q_4$ 是开关器件， $D_1 \sim D_4$ 是各个开关器件并联的二极管， $C_1 \sim C_4$ 是开关器件内部寄生电容或外部并联电容，用来限制每个 IGBT 开关管上的 du/dt ， L_r 是变压器的总漏感， $D_5 \sim D_8$ 是整流桥二极管， C_0 和 R_0 并联为负载的等效模型。但是移相过程中，位于同桥臂的上下开关器件无法在同一时刻导通，需在同使导通的开关管配置死区时间；并且前桥开关器件 Q_1 、 Q_2 需要提前于 Q_3 、 Q_4 $0 \sim T/2$ 。

当回路比较稳定的时候，移相变换器工作过程如下：

(1) $t_0 \leq t < t_1$ 阶段，工作模态 1， $Q_1 Q_4$ 导通， t_0 时刻电流流向为 $Q_1 - Q_4$ ， $D_6 D_7$ 导通，为 $C_0 R_0$ 输出电压。工作状态见图 2.19。

(2) $t_1 \leq t < t_2$ 阶段，工作模态 2， t_1 时刻时，在 C_1 影响下， Q_1 大致完成零电压截止， Q_4 依旧导通。因为设置了死区时间， Q_1 关断后 Q_2 无法快速导通， Q_3 处于关断状态，电流通过电容 $C_1 C_2$ 所在支路上，为 C_1 充电，而 C_2 放电。 t_2 时刻 C_2 两端电压过 0， C_1 变为电压源， D_2 导通。工作状态见图 2.20。

(3) $t_2 \leq t < t_3$ 阶段，工作模态 3， t_3 时刻 D_2 已导通，此时 Q_2 基本零电压导通， Q_4 仍为导通，电流流向为 $D_2 - Q_4$ 。工作状态见图 2.21。

(4) $t_3 \leq t < t_4$ 阶段，工作模态 4， t_4 时刻，在 C_4 影响下， Q_4 零电压截止， Q_2 依旧导通。因为设置了死区时间， Q_4 关断后 Q_3 无法迅速导通，电流经过电容 $C_3 C_4$ 所在支路上，为 C_4 充电，而 C_3 放电。工作状态见图 2.22。

(5) $t_5 \leq t < t_6$ 阶段，工作模态 5， t_5 时刻， D_3 导通，此时 Q_3 零电压导通， Q_2 仍为导通，电流流向为 $Q_2 - D_3$ 。工作状态见图 2.23。

(6) $t_6 \leq t < t_7$ 阶段, 工作模式 6, t_6 时刻, D_3 导通, 此时 Q_3 零电压导通, Q_2 仍为导通, 电流流向为 Q_2-Q_3 。 t_7 时刻, 电流反向。工作状态见图 2.24。此时, 工作周期仅为 $T/2$, 下一个 $T/2$ 与前一个 $T/2$ 对称。

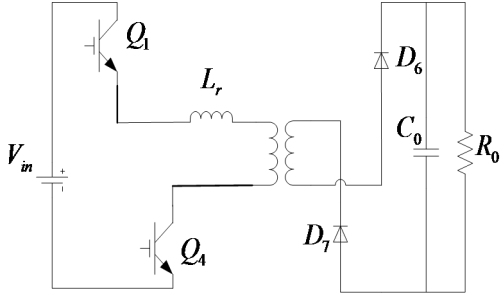


图 2.19 工作模式 1

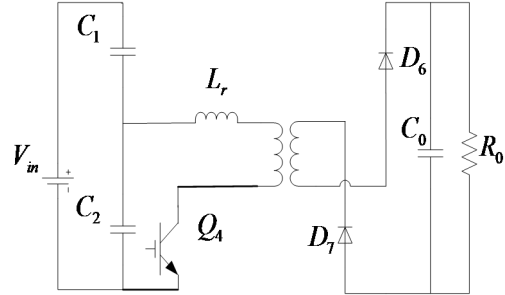


图 2.20 工作模式 2

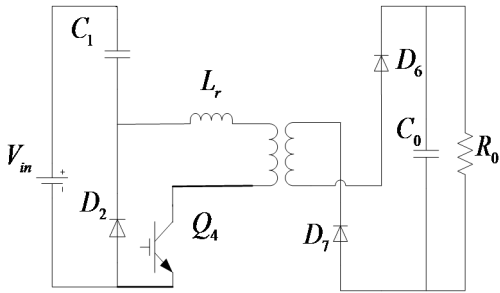


图 2.21 工作模式 3

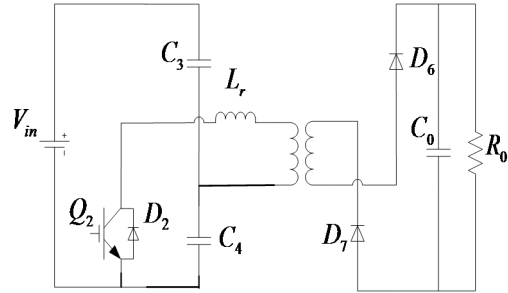


图 2.22 工作模式 4

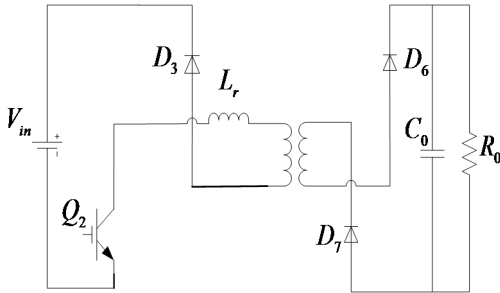


图 2.23 工作模式 5

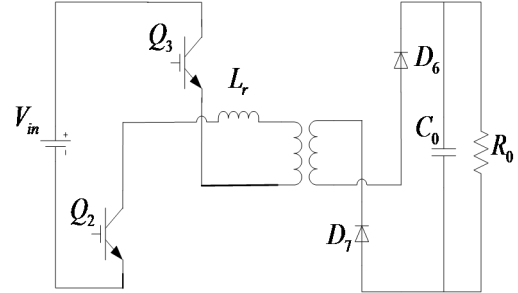


图 2.24 工作模式 6

2.4 本章小结

本章首先介绍了静电除尘器几种电源, 包括单相晶闸管电源、三相晶闸管电源和高频 IGBT 逆变电源, 并对其工作原理进行分析。对主电路里的变压器特性展开讨论与研究, 给出除尘设备负载等效模型。然后介绍了软开关变换器的发展和应用, 并对 LCC 谐振变换器一个工作周期内每个工作阶段和移相全桥变换器的工作状态进行了详细的介绍, 为后面的建模与仿真打下基础。

3 主电路参数计算

3.1 三相整流输入电路

以往工业生产当中静电除尘器供电装置，都是以可控硅调节其开关来改变输出电压。本文介绍的高频 IGBT 逆变供电装置，采用全控型器件组成的单相逆变桥电路，然后利用改变驱动全控型器件的驱动波形的占空比来改变负载两端电压。所以主回路中供电电源利用三相不可控桥式整流桥，因为该桥构造不仅简洁方便，价格也比较低，三相供电的端口利用滤波电容来改善电压波形。三相整流桥回路如图 3.1 所示。

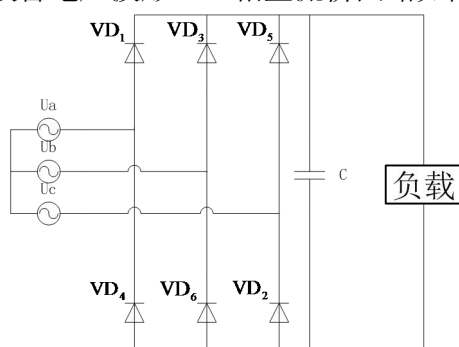


图 3.1 三相整流桥回路

三相整流桥采用六个不可控器件二极管连接构成。其中电路中有三个输入端，接入三相电源或者整流变压器的三相输入端，这里接入的是三相电源，分别为 U_a 、 U_b 和 U_c ，两个输出端口提供的是直流电压，电路中 C 为滤波电容，三相整流桥主要需要设置二极管的参数。

在不考虑外界因素的情况时，三相整流桥空载的话，输出电压平均值为：

$$U_d = \sqrt{6}U_2 = 2.45U_2 \quad (\text{式 3.1})$$

式中 U_2 为相电压的有效值。

线电压即是输出电压平均值 U_d ：

$$U_d = 2.34U_2 \approx 513V \quad (\text{式 3.2})$$

随着负载不断增加饱和状态后， U_d 会保持为 $2.34U_2$ ，又由于会有 $\pm 10\%$ 波动误差及输送电线压降，由于这种外在因素的影响，整流桥 $U_d = 530\text{V}$ 。静电除尘电源输出功率 $P_0 = 72\text{kW}$ ，这里设定 $\eta = 95\%$ ，可以分析计算出母线电流平均值：

$$I_d = \frac{P_0}{U_d * \eta} = 159\text{A} \quad (\text{式 3.3})$$

线电压峰值即整流桥二极管所能承受的最大反向电压， $1.1 * \sqrt{6}U_2 \approx 593\text{V}$ 。考虑到电流裕量 1.9 倍，电压裕量 2.1 倍，这里可以选择 ASEMI 品牌的型号 MDS300A 的三相整流桥，其额定正向平均电流为 300A，最大反向电压为 1200V。

3.2 整流回路中滤波电容的设计

主电路中三相不控整流电路输出的直流电压和电流有一定的波动，若不进行滤波，就无法向负载提供稳定的电压。滤波的方式有两种，一为在回路中并联容量比较大的电容组成电压型电路，可以将整个回路整体看成是电压源；二为在回路中串联值比较大的电感组成电流型电路，可以将整个回路整体看成是电流源。这里采用的是第一种方式。

因为电容隔直流通交流和阻止低频导通高频特点，采用并联电容的方式滤波。从基础知识可以得出，当回路为电压型回路时，当滤波电容的值取得较高时，直流电压波动会很小、很稳定，但工业生产工程时，花销不仅要尽可能少，还要注意电源导通的时候取值大的电容会产生很大冲击电流，所以滤波电容这个取值是需要严格分析与计算。三相电压的表达式为：

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{\sqrt{6}} U \sin \omega t \\ U_b = \frac{1}{\sqrt{6}} U \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ U_c = \frac{1}{\sqrt{6}} U \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (\text{式 3.4})$$

式中 U 是供电电源线电压的有效值， ω 是整个大电网的角频率。在未接入并联 C 时，整个电路的电压是：

$$U_0 = \sqrt{2}U \cos(\omega t - n\pi/6) \quad (\text{式 3.5})$$

$$\omega t \in \left(\frac{(n-1)\pi}{6}, \frac{(n+1)\pi}{6} \right) \quad (\text{式 3.6})$$

假设三相不控整流桥不并联 C 时 U_0 最大是 $U_{0\max}$ ，并联 C 后直流电压最小值是 $U_{\text{cap min}}$ ，若波动幅度假设定 a%，则

$$U_{\text{cap min}} = U_{0\max} (1 - a\%) = \sqrt{2}U (1 - a\%) \quad (\text{式 3.7})$$

则直流侧输出端的阻抗 $R = \frac{U_{0\max}^2}{P}$ (式 3.8)，P 是单相 IGBT 全桥逆变桥的输出功率。

回路中 C 放电简化见图 3.2。

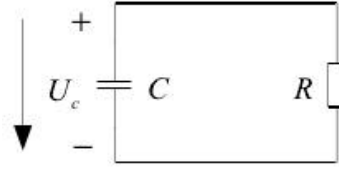


图 3.2 滤波电容 C 放电的等效图

电容 C 的初始电压为 $U_{c(0+)} = \sqrt{2}U$ ，t 时刻后，电容的电压方程为：

$$\begin{cases} U_c = \sqrt{2}U e^{-\frac{t}{\tau}} \\ U_c > U_{\text{cap min}} \\ \tau = RC \end{cases} \quad (\text{式 3.9})$$

$$\text{即 } \sqrt{2}U e^{-\frac{t}{\tau}} > \sqrt{2}U (1 - a\%)。 \quad (\text{式 3.10})$$

由图 3.3 可知，电容的放电时间为 $t_f = t_3 - t_1 = (t_3 - t_2) + (t_2 - t_1) = t_0 + T/12$ ，由图中波形的对称性可以看出， t_0 时刻对应的电压值即为最小值 $U_{\text{cap min}}$ ，因为我国的用电频率为 50Hz，所以 $T=0.02\text{s}$ 。

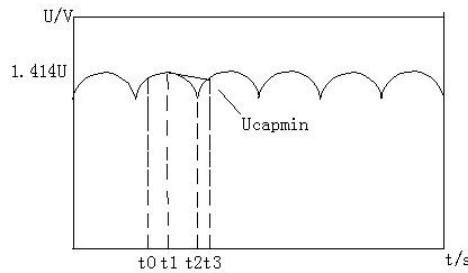


图 3.3 三相整流桥输出电压波形分析

综合以上公式，可以得出：

$$C > \frac{t_f}{R \ln \frac{1}{1-a\%}} \quad (\text{式 3.11})$$

当输入 380V 50Hz 交流电时，假设功率 $P = 72\text{kW}$ ，由（式 3.8）可以算得 $R = 3.61\Omega$ 。这里假定输出电压的波动为 5%，则 $C > 12.54\text{mF}$ 。由于受到电容实际大小的限制，这里可以考虑选用 12 个值为 $1100\mu\text{F}$ 的电解电容，耐压值为 450V，每个电容上并联一个 100k 左右的均压电阻。三相整流桥的输出电压波形以及三相交流电压见图 3.4。

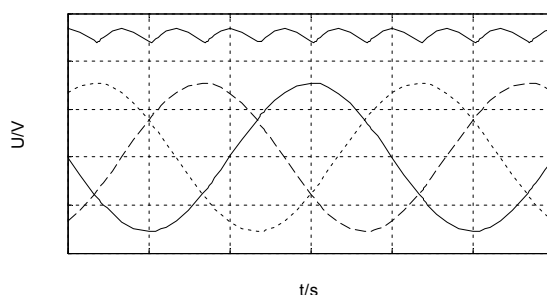


图 3.4 三相整流桥输出电压和三相交流电压图

3.3 主功率开关器件选型

由三相不控整流电路输出的直流电压作为逆变器的输入，上节已介绍并联滤波电容以后可以为逆变器提供稳定的直流作为输入。静电除尘器传统采用晶闸管供电装置通过调节触发角控制变压器原边电压来实现的，在电力电子技术的不断发展得过程中，高频 IGBT 逆变器已被应用到静电除尘设备电源系统当中。

通过上节内容已得出，三相工频交流通过整流桥所产生地直流电压是 $530 \pm 5\%V$ ，作为单相 IGBT 全桥逆变器的输入，由于电压有 2 倍裕量，这里选用额定电压是 1200V 的 IGBT 全控型器件。设定静电除尘设备极板间平均电压是 72kV，算得高频变压器变比 $k=1/144$ ，变压器二次侧的整流桥的输入电流最大为 1A，所以变压器一次侧电流最大为 144A，考虑到两倍裕量，全控型器件 IGBT 额定电流可以为 300A，因此可以选择国外英飞凌企业生产得 IGBT FF400R12KE3，这个型号的器件里面带有反并联二极管。



图 3.5 型号为 FF400R12KE3 的 IGBT

3.4 高频变压器设计

静电除尘设备的供电装置要求在 20kHz 的频率下工作，所以变压器设备的设计要求比较严格，要使变压器磁芯材料的高频损耗越小越好，对于温度变化所受的影响也要尽可能的小，受这些条件的限制，变压器的磁芯可以选为 Mn-Zn 铁氧体。这里选用美磁公司生产的磁芯。

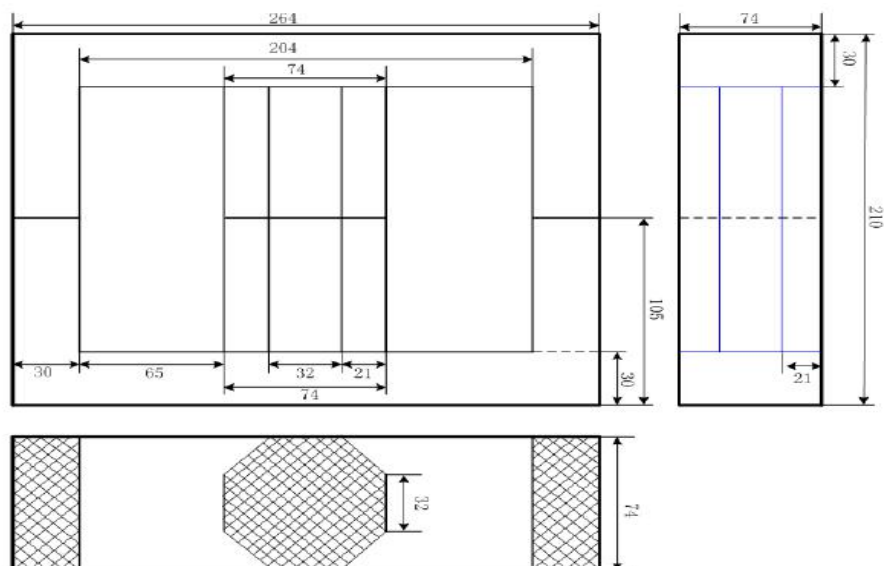


图 3.6 铁芯尺寸图

由变压器磁芯材料的平面图可以计算出磁芯材料有效截面积为：

$$A_e = 4 \times 3.2 \times 2.1 + 4 \times \frac{1}{2} \times 2.1 \times 2.1 + 3.2 \times 3.2 = 45.94 \text{cm}^2 \approx 46 \text{cm}^2 \quad (\text{式 3.12})$$

根据最小输入电压值来确定变压器变比 k ，三相整流电路输出电压大约是 500V，经过 IGBT 逆变器逆变以后得到大致为 500V 交流电，以此输入到变压器原边侧，因为设定的最高输出电压为 72kV，所以变比为：

$$k = \frac{U_{1\min}}{U_{0\max}} = 1/144 \quad (\text{式 3.13})$$

然后根据变压器原边匝数公式

$$N_p = \frac{U_{1\min}}{K_f f_s B_m A_e} \quad (\text{式 3.14})$$

可以求得变压器原边匝数。其中 $U_{1\min}$ 是变压器最小输入电压， K_f 是波形系数， f_s 是变压器运行频率， B_m 是磁感应强度最大值， A_e 是磁芯材料有效截面积。这里设定 K_f 为 4， f_s 是 20kHz， $B_m = 0.3\text{T}$ ，代入公式可以得出 $N_p = 5$ ，由变比得出变压器二次侧绕组是 720 匝，需要分为八个线包，其中每个线包 90 匝。

3.5 高压整流桥设计

静电除尘设备极板两端电压要求是直流高压，所以需要高压整流装置来将变压器二次侧交流电整流成直流，由于变压器处于高频工作的状态，因此需要选用快速恢复二极管作为整流装置的主要器件，变压器二次侧输出的电压最大值即为二极管所承受的最大反向电压，计算公式为：

$$U_{Dr} = U_{1\max} / k = 560 \times 144 = 80640\text{V} \quad (\text{式 } 3.15)$$

由于变压器二次侧要用 8 个线包，所以单个线包上电压要达到 $80640\text{V}/8 = 10080\text{V}$ ，根据这个条件可以选择 Diode Ins 专业制造快速恢复二极管，选择型号是 BY359X-1500，因为其最大反向电压为 1300V，反向恢复时间是 $T_{rr} = 350\text{ns}$ ，所以一个桥臂则需要 10 个二极管串联起来才能达到要求，四个桥臂总共有 40 个，因此整个整流装置需要 320 个二极管。最后将八个整流桥串联起来，便可向负载两端输送高压直流。

3.6 本章小结

本章根据静电除尘器供电装置的主电路，通过根据主电路的理论分析，为其中各个主要部分涉及的元件展开参数计算以及在实际工业中的器件选择，包括三相桥式不控整流电路中滤波电容、逆变部分全控型器件 IGBT、变压器磁芯以及整流硅堆中的具有快速恢复能力的二极管，都给出合适选型和基本设计，并通过计算变压器变比 k 对其一次侧以及二次侧线包数给出分析设计。

4 高压静电除尘系统的控制

通常情况下，静电除尘系统供电电源极板两端电压值很大的话，除尘效率就会很显著。但是在实际工业生产中，电除尘器自身所能承受的输出电压是有上限值的，一旦超过了最大值，除尘器极板内电场就会频繁放电，除尘效率就会大打折扣。因此，要将输出电压维持在上限值的附近，达到一定闪络率。

本文中控制部分需要注意的地方有：（1）检测母线上的电压和电流，防止因电路损坏带来不利影响；（2）当极板被火花击穿时，需要知道断定击穿现象的条件，快速作出反应，避免反应迟缓或者判断失误；（3）自动跟踪临界电压值，根据临界值调节输出电压。系统整体控制思路如图 4.1 所示。

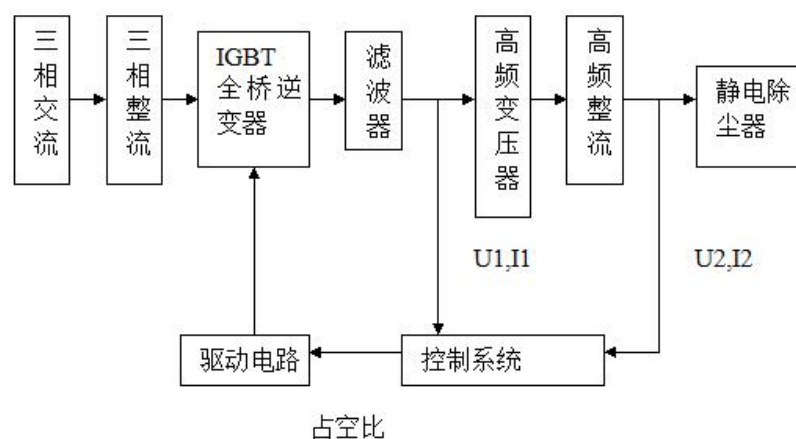


图 4.1 静电除尘系统总体控制结构图

4.1 控制方式选择

逆变桥中开关器件通断需要根据全控型器件的驱动信号调制，比较典型的控制方式包括：PAM、PWM、PFM 和脉冲移相控制。本文选用的是 ZVS-PWM 移相全桥变换器控制，和传统的硬开关 PWM 全桥变换器控制方式不同的是，该变换器通过利用谐振电感和开关管内的寄生电容组成谐振元件，能够让开关管达到零电压导通的条件，实现软开关技术，进而达到对输出电压控制。静电除尘系统中利用改变驱动逆变桥的 PWM 信号的占空比来改变输出，以达到控制的目的。

4.1.1 数字 PID 闭环控制

当代工业中，PID 控制器为大力推广的实用技术。PID 控制算法是集比例、积分及微分于一体得线性调节方式，可以通过给定值以及实际值计算得偏差量，再通过 K_p 、 K_i 及 K_d 共同作用地控制信号输出至被控对象。PID 控制原理图如图 4.2 所示。

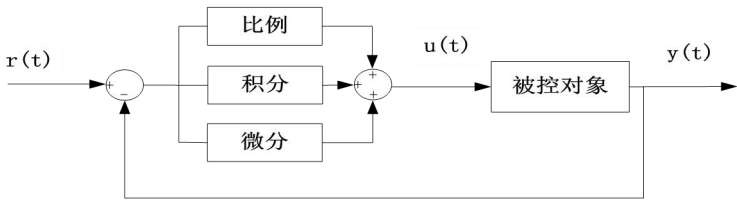


图 4.2 PID 控制原理图

在比例算法时，控制器输出量则按 K_p 反映与实际值的误差量，当误差不为零时，比例控制器会立即做出控制使得误差量减小；在积分算法时，控制器输出量则和误差量积分为正比关系，当误差不为零时，该算法将控制偏差量使其尽可能减小为零使得输出量稳定在某个不变量；在微分算法中，控制器输出量和误差量微分为正比关系，该算法通过对误差量波动形式给出超前调节，达到提高控制对象暂态性能目的，在误差值波动基本稳定时，微分算法调节不起作用。一般情况下，积分算法是和比例算法（微分算法）配合工作，例如 PI 控制（PID 控制）。微分算法也是和比例算法或积分算法配合工作，例如 PD 控制或 PID 控制。

PID 控制器在对逆变电源的模拟控制中得到广泛的应用，通过与模拟电路的比较，表 4.1 列出数字化控制的优缺点。

表 4.1 数字化控制优缺点

控制方式	优点	缺点
数字化控制	(1) 可以实现复杂的控制方式	(1) 控制速度较慢
	(2) 可靠性高	(2) 功率较小的设备集成度有待提高
	(3) 提高控制系统一致性	
	(4) 修改成本低，周期短	
	(5) 可以不断提高系统的控制性能	

4.1.2 闭环控制实现

逆变供电方式通常情况下有开环和闭环两种控制方式，所谓开环控制，即控制系统和被控对象仅有顺向影响而不存在逆向影响。而闭环控制即为控制装置与被控对象有逆向作用，被控量影响整个控制系统的方式。在逆变供电系统中，一般通过输出量作为反

馈信号作用于控制系统，再通过 PI 调节即可，为了对系统动态性能进行改善，双闭环控制系统即在用电压反馈的基础上加入电流反馈，由于静电除尘设备对输出电压要求比较高，所以采用闭环控制较好。

由于需要对系统的中间量和输出量进行跟踪调控，因此采用 PI 控制方式即可满足要求，此控制方式可靠性高，算法也很简单以及稳定性强。通过将给定值和输出量的反馈量展开调节，然后将被控量作为调节输出量的依据。采用双环控制不仅可以提高设备动态响应，也可以提高整个设备工作效率，对供电装置稳定输出起到很大作用。图 4.3 为静电除尘系统控制框图。

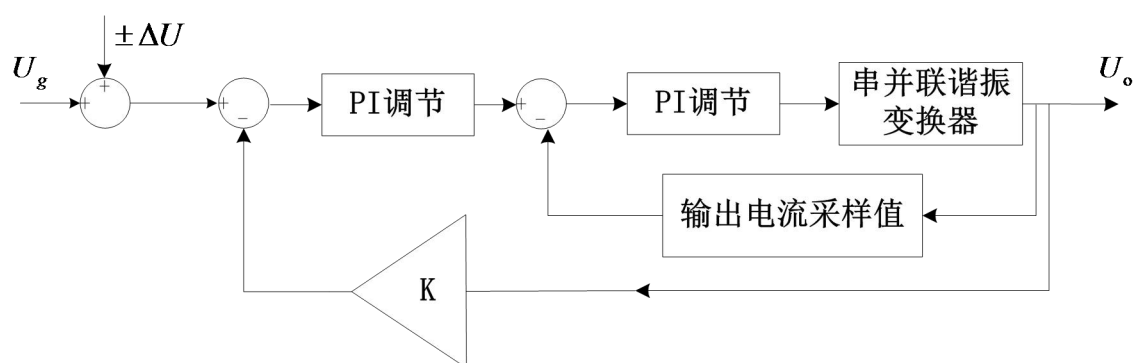


图 4.3 静电除尘系统控制框图

电源装置中将输出得电流和电压共同并入负反馈，构成了双闭环调节。将输出电压通过反馈比例系数 K 后和设定电压量作差，将偏差值送入至 PI 控制当成电流调节参照，然后和负载电流值做差，然后把偏差值通过另外一个 PI 控制器控制电压，输出信号至移相控制器用以驱动 IGBT。这里采用电压的误差值控制电流，可以通过调节电流来达到跟踪电压控制的目的，提高系统的动态响应。

双环控制具有很多优点：（1）可以提高系统动态响应；（2）可以使内环对象的等效时间常数减小；（3）改善整个装置工作频率，避免内环产生干扰；（4）对负荷变化有很强的适应能力，使控制装置有很好稳态性能，改善供电设备输出特性。

4.2 闪络控制

高压静电除尘器供电装置两个极板间电场很大的时候，带电颗粒吸附在集尘极上的本领才会大，所以电场越强极板间电压越高，需要设定上限值，如果输出电压大于上限值的话，两极板间将出现火花击穿现象，会使输出电压快速地降低，进而影响除尘效率。所以，单靠利用加大输出电压值是不能够加大除尘设备工作效率。然而若将输出电

压值稳定在比上限值略微小的值附近的话，那么系统工作效率不仅可以得以改善，电路消耗也得以减小。

静电除尘系统通过交流接触器接入三相 380V 交流电，控制系统进入运行状态。上电后，首先读取电除尘器之前的运行参数，这些参数也是系统调整 IGBT 占空比的一部分参考值。与此同时，分析电流、电压信号等参数，了解电场的大概工况，进而自动调节占空比，以调节电压的输出。然后通过高频变压器以及整流滤波，产生得高压直流施加到负载两端，控制电除尘器运行在某种模式下。如果极板间发生闪络现象，读取并记下负载两端电压以及电流值，并通过相应算法判断出闪络强度。电场中，当闪络停止时，控制系统会根据已经确定好的火花率继续工作，并继续增大占空比，直到火花放电现象再发生，不停重复上述过程来控制输出电压。为了使静电除尘器工作于理想状态，即保持极板间电压非常接近闪络放电电压的值，需要对高压静电除尘电源进行控制。

4.2.1 闪络判定

实际工作当中，除尘设备极板间电场电压总会超出某个值使得极板发生击穿，就会形成放电通道，这就是所谓的闪络现象。在没有切断电源的情况下，放电通道会导致拉弧。所以，静电除尘器电源负载电压必须工作于系统设定的上限值之下而不会使得设备形成击穿。但是因为在工业生产时扰动的影响，击穿现象无法消除。火花放电判定过程中，遗漏检查以及错误信号都时有发生。因此，极板间火花放电的检测条件成为核心问题。根据闪络发生的过程得出负载输出信号会在发生击穿时表现出敏感的变化，即电压值骤降及电流值迅速升高，所以，这些信号即能成为判断闪络的条件。

在设备正常工作时，要不断记录负载两端电压值以及电流值的变化，以输出信号的波动情况为判定依据，看其是否会发生击穿现象。因此有两种办法：

(1) 输出电压判定

发生击穿时，负载两端电压值骤降。因此根据设备的输出信号可以检测出系统是否发生了火花击穿。一个是直观的办法即负载电压值等于闪络电压；另一个是输出电压迅速下降。

由于工业设备运行时外加因素很复杂，要想直接算得闪络电压值是很复杂的，由于负载两端的输出电压会有波动，要避免检测出现错误，要对闪络电压及正常运行的极板电压进行分析对比。输出电压检测方法见下图。

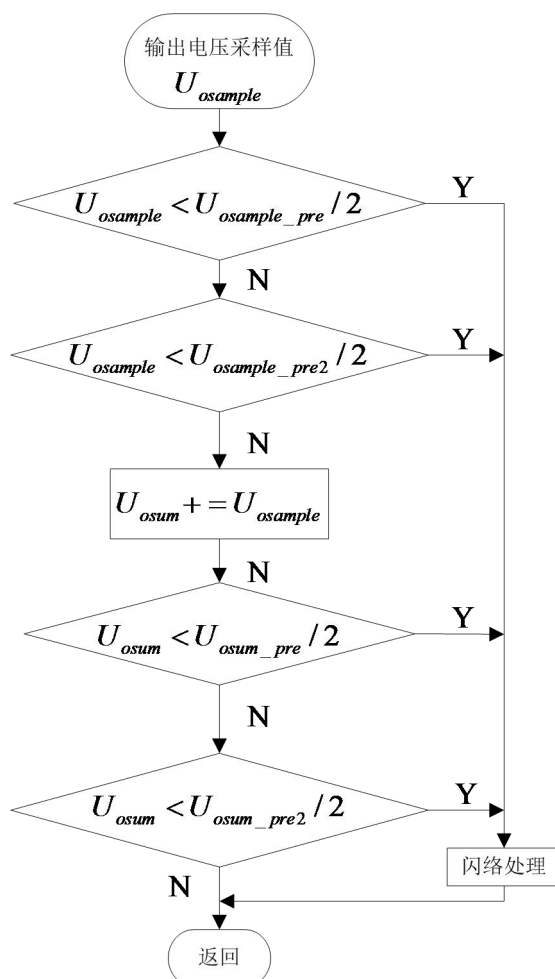


图 4.4 依据负载端电压值判定闪络框图

设定输出电压采样周期为 $50\mu s$ ， $U_{0sample}$ 为现在周期的采样值， $U_{0sample_pre}$ 以及 $U_{0sample_pre2}$ 为靠前相邻周期的输出电压采样值，若 $U_{0sample} < 0.5U_{0sample_pre}$ 或 $U_{0sample} < 0.5U_{0sample_pre2}$ ，则闪络发生。否则取比较靠近得三个采样周期采样值一起相加，算出现在累加周期之和 U_{0sum} 以及靠前相邻累加周期的累加值 U_{0sum_pre} 以及 U_{0sum_pre2} ，如果 $U_{0sum} < 0.5U_{0sum_pre}$ 或 $U_{0sum} < 0.5U_{0sum_pre2}$ ，则闪络发生。极板有击穿现象时必须及时处理，若处理不及时，就必须返回然后再次执行电压判定程序。

(2) 输出电流判定

极板击穿的过程中电流会迅速增大，可以看作是短路，也会涌现很多高次谐波。和电压判定相同，为系统设置采样周期，采样值需要和正常状态下的负载端电流进行对比，采样值将远远高于负载端电流的最大值，这就是利用电流判定火花击穿的方式。输出电流检测闪络发生的方法见下图 4.5。

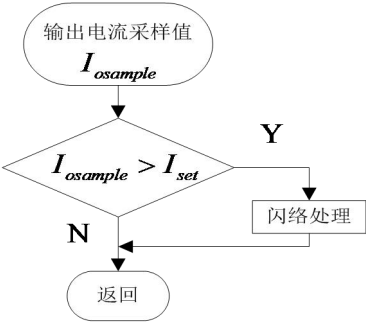


图 4.5 输出电流闪络判定流程框图

系统中对于火花击穿现象不允许错误检测以及遗漏检测，所以这里采用输出电压以及输出电流一起检测的方式来断定极板间是否发生击穿现象。判定流程图见下图。

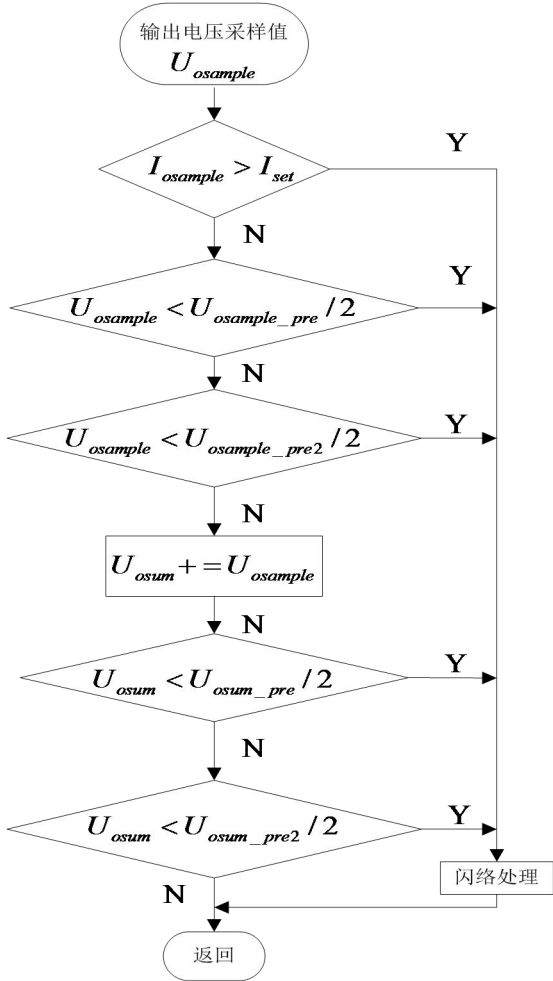


图 4.6 共同判定流程框图

4.2.2 闪络处理

如果极板间发生击穿而没有迅速采取措施，极板间产生电弧，不仅降低设备工作效率，也会威胁到系统中的元器件。因此当利用条件判定闪络出现的话，必须迅速断开电

路，电弧就不能继续存在，放电通道无法得以维持，这里采用关断逆变桥的开关管来进行击穿后的应对。当闪络发生时，应立刻减小逆变桥驱动信号的占空比，减小供电电源或者切断供电装置让其不能为负载输出电压，等待一段时间后，让介质恢复，随后再改变占空比的值，让供电装置恢复正常得工作状态。

4.2.3 控制方式

由于静电除尘系统极板间的灰尘总是处于不同的状态，要达到即使灰尘状态不唯一的情况下依旧使得除尘设备工作在比较大的工作效率下，就需要对系统的输出电压采取稳定的控制方式。

总结以往工业生产中的实际经验，静电除尘系统供电装置控制的办法有很多种都能够使得系统稳定运行，根据其调节目的进行分类包含有最高平均电压控制、闪络跟踪控制和可调间歇供电控制。现代工业企业中控制系统一般采用多种调节方法共同作用的办法来控制除尘设备，不同的工业场所需要不同的除尘器电源。

(1) 最高平均电压控制

根据多依奇公式可以知道，静电除尘设备工作效率和极板间电场的平均电压存在正比关系，若要保证除尘设备工作效率比较大的话，就要保证输出端平均电压尽可能得大。对于极板两端平均电压的调节，需要通过在每个运行周期内对输出电压记录并采样，当极板间电压升高的时候，要将现在采样记录的电压值与上一周期的采样值展开对比分析，如果两值相减大于零时，就可以不断加大电压值，如果两值相减小于零时，就需要降低供电装置所供给电压的峰值，直到不发生闪络现象，继而再升高电压。这种控制方式比较简单，但是响应时间比较长，对于闪络处理不及时，容易导致除尘效率降低。

(2) 可调间歇供电控制

可调间歇供电调节方式是通过在一个固定的时间内对逆变桥进行导通与截止，进而达到减小电源能量输出的目的。这种调节方式也比较方便，不仅使得极板两端电压值降低，又减小了电路中能量的消耗，更是降低了反电晕现象发生的几率。

(3) 最佳闪络率控制

静电除尘极板间的闪络率即在单位时间里发生闪络的次数，一般以 1min 时间里闪络次数为基准。最优闪络率控制即将电场中高压闪络当作反馈信息，如若极板间闪络现象发生，需要将该指令送到供电装置的控制装置里，系统接收该信号就立刻向系统输送

延时信号并截止开关器件。采用改变极板间电压的升高速率调节当前闪络与上一个闪络之间的时间，来达到提升设备工作效率。最佳的闪络率通常要低于 60 次/min。对最佳闪络率进行调节一般都处于除尘设备供电装置刚开始运行这段时间里。因此供电装置刚开始运行时应该符合下面几点：

(1) 当电源刚开始运行的时候，负载两端电压的增大速率要能够依据控制量的大小来调整。

(2) 当负载两端的电压增大的时候，需要更适应电源系统中元器件以及介质恢复波形因此电压波形可以分为若干段，极板间形成火花击穿时，为了防止灰尘散逸率，供电装置逐步恢复正常运行的状态下，输出电压需要以一个比较大的速率上升到能通过闪络上限值改变的位置，才能加大供电装置电能的利用率，紧接着再慢慢增加到系统预先给定得上限值。

(3) 在输出电压值增大到预先给定得上限值后，如果未发生火花击穿现象，就应该增大输出电压增大得速度让除尘器形成临界闪络现象，以便得到另外一个闪络电压值。

下面是三段式升压闪络跟踪调节的办法，将输出电压以不同时间段内不同的增长速率来改变相邻周期内的时间间隔。控制原理如图 4.7 所示。

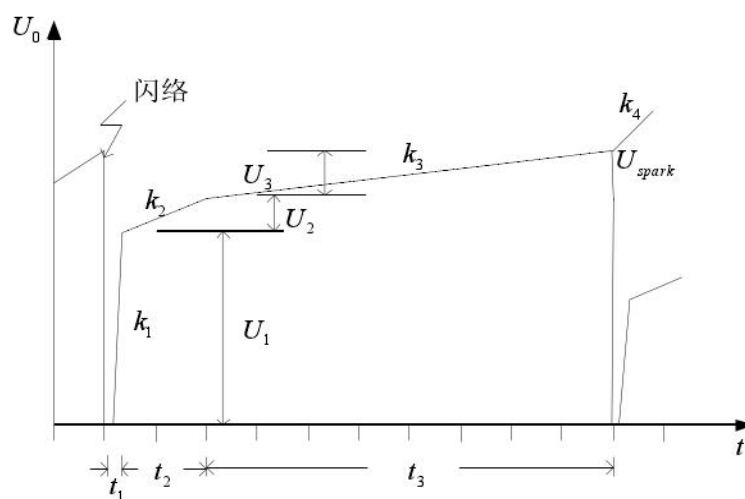


图 4.7 静电除尘电源装置中闪络跟踪调节原理

图中 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为 4 部分电压值不同的增长斜率。输出电压 U_0 先以 k_1 速率增长到 U_1 位置，来达到减少烟气颗粒的逸散率，同时需要避免电源介质在恢复运行的时候闪络现象又一次产生， U_1 值必须要满足一定的条件，由于静电除尘设备供电装置运行场所多变性， U_1 一般要达到闪络电压值的 40%~80%，这里选择的 U_1 为闪络电压的

70%。然后整个周期的20%时间里面将 U_1 提高至闪络电压值的80%，电压上升得增量为 U_2 ，运行周期内余下时间里 U_o 使用 k_3 斜率逐步提升，当时间达到 t_3 ，输出电压值即可升至闪络电压值 U_{spark} 。若 U_{spark} 条件下仍未出现火花击穿现象，电压值需要用比 k_3 较高的增长速率 k_4 来提升增加 U_o ，直到火花击穿的现象发生为止。通过控制前后周期内相邻闪络电压时间间隔来达到跟踪电压控制。

4.2.4 反电晕

反电晕又称反电离，在粉尘比电阻 $\rho > 10^{11} \Omega \cdot cm$ 的情况下， ρ 越大，除尘设备工作效率降低。 ρ 较大的灰尘颗粒在极板间运动较迟缓，和排列在其后的灰尘颗粒形成排斥从而导致电位梯度。粉尘颗粒越多，极板间电场越强，但如果大于限定值的话，烟气颗粒内部将引发局部击穿，会使本该游向集尘极的颗粒游向电晕极，导致电晕极极性降低，无法使烟气颗粒带电使得颗粒再次飘散、负载电流提升、输出电压减小、工作效率减弱。不及时处理的话电晕电流继续提升，整个设备将一直运行在电压较低的工作模式，容易引发极板全部击穿。

反电晕的出现会导致极板间发生火花击穿，然而此时的火花击穿与普通情况下发生得火花击穿性质不一样。反电晕触发条件下火花击穿的产生具有随机性，由集尘极和极板间的灰尘引起击穿现象，发生的范围比较广，例如设备可能处于正常运行情况，可能发生是负载端电压比较小得情况。正常闪络现象则因为负载端电压值高于除尘器两个极板电压上限值，一般出现于负载两端电压最大值的时候。

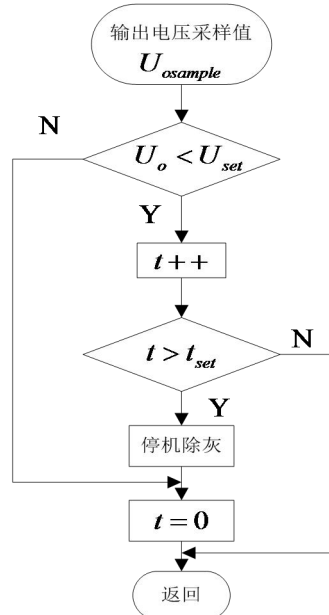


图 4.8 反电晕判断流程图

防止反电晕现象发生的办法有：一种通过利用不同的供电方式即脉冲或间歇供电方式，一种为降低烟尘比电阻。通过其两种方法的理解认识，在静电除尘器设备的设定输出电压值比发生电晕现象的电压值低的时候，即为反电晕条件，其处理系统将准备进入工作状态。在反电晕处理系统的工作时间完成，即开始进入除灰阶段，处理完毕后整个除尘设备进入下一个工作。

4.3 本章小结

本章对PI控制方式使用得可行性和不可行性进行了分析，并且给出了单环以及闭环两种控制方式的对比与分析。然后将静电除尘器除尘系统工作时产生的闪络现象原理展开探索，以控制原理为基础，给出了闪络判定和闪络处理的方法，其中根据闪络发生时输出电压和电流的变化给出输出电压和输出电流共同判定的方式，确保判定的可靠性。根据以往的工业经验，提出了三种静电除尘电源的控制方式，其中对三段式火花控制进行了详细的描述，也对反电晕进行了分析，给出了能够有效抑制反电晕的方法即采用间歇供电即可。

5 MATLAB 仿真与分析

5.1 静电除尘器电源仿真

5.1.1 单相可控硅电源仿真

单相可控硅电源输入为工频下电压型交流电源 380V，当触发角为零时，整流部分的输出电压平均值和输入电压的有效值关系为： $U_d = 0.9U_2$ ，当按要求输出的平均电压为 72kV 时， $U_2 = 80 \text{ kV}$ ，因此可以算出加到静电除尘器两极板间的最高峰值电压 $V_p = \sqrt{2}U_2 = 113 \text{ kV}$ ，这样模型中变压器变比设置为 1:298，反并联的两个晶闸管参数设置为 $R_s = 50\Omega$ ， $C_s = 4.7e-6 \text{ F}$ ， $R_{on} = 1e-3\Omega$ ， $L_{on} = 0 \text{ H}$ ， $V_f = 0.8 \text{ V}$ 。两个脉冲发生器相位需要设定互差 180° ，通过改变这两个脉冲发生器相位延迟时间来对输出电压进行调节。单相可控硅电源 MATLAB 建模见图 5.1。仿真算法选择 ode23tb，进行模拟，负载两端输出电压见图 5.2。

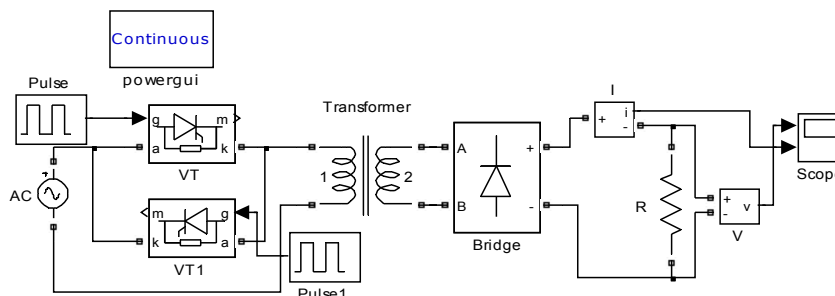


图 5.1 单相可控硅电源仿真模型

从单相电源的仿真图形图 5.2 可以看出，电压波形是以半个正弦波的形式波动的，电压的波动范围比较大，使得极板间的平均电压降低，从而降低了除尘器的除尘效率。单相可控硅供电方式输出电压的峰值比极板间电压值大得多，容易使两个极板间发生火花击穿，很容易使得除尘效率降低。并且单相电源中含有谐波，使整个电网处于不稳定的状态。

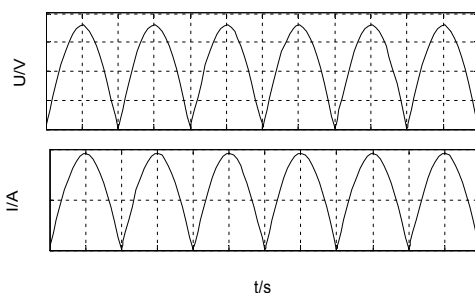


图 5.2 相控角 $\alpha = 0$ 时负载端电压和电流波形

5.1.2 三相可控硅电源仿真

三相可控硅电源仿真模型中的电源输入为相位互差 120° 的三相交流电 380V，和单相电源不同的是，当触发角为零时，整流部分的输出电压平均值和输入电压的有效值关系为： $U_d = 2.34U_2$ ，当按要求输出的平均电压为 72kV 时， $U_2 = 30.78\text{kV}$ ，因此可以算出加到静电除尘器两极板间的最高峰值电压 $V_p = \sqrt{2}U_2 = 43.5\text{kV}$ ，这样就可以将变压器的变比设置为 1:198，模型中三对反并联晶闸管参数设置为 $R_s = 50\Omega$ ， $C_s = 4.7e-6\text{F}$ ， $R_{on} = 1e-3\Omega$ ， $L_{on} = 0\text{H}$ ， $V_f = 0.8\text{V}$ 。通过控制脉冲发生器的移相控制端的大小来对输出电压进行控制，三相可控硅电源 MATLAB 模型见图 5.3，仿真算法选择 ode23tb，进行仿真，当相控角等于零时负载两端电压值以及电流仿真波形如图 5.4 所示。

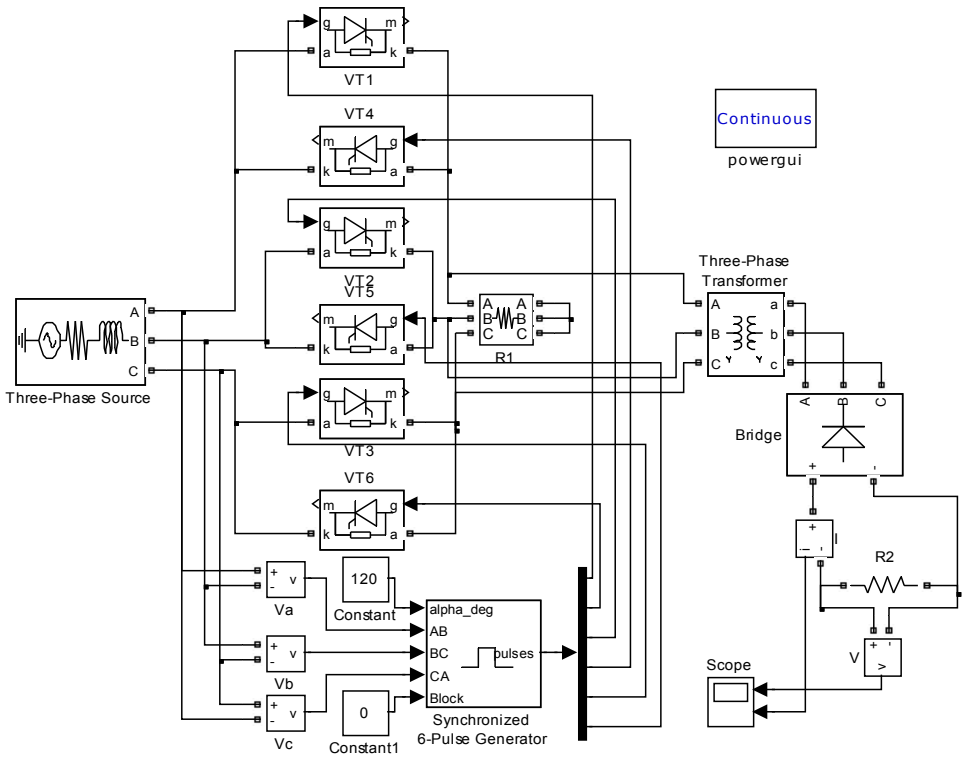


图 5.3 三相可控硅电源仿真模型

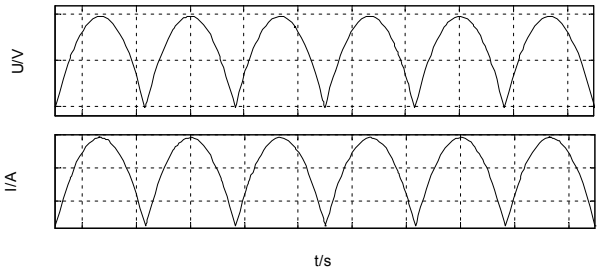


图 5.4 相控角为零时输出电压和电流的波形

相较于单相电源，三相电源的峰值电压比较低，对于击穿电压更便于控制，从图 5.4 的仿真结果中可以看出，三相电源的波形由六个波头组成，比单相电源的输出电压更加稳定，波形波动的幅度比较小，这样输出电压的平均值就会增大，能很好的提高除尘效率，并且三相电源的波形中没有谐波，因此在大电网中三相电源不会产生较大的副作用，同时电源能量利用率相对比较高。

5.1.3 高频 IGBT 逆变电源仿真

高频电源的仿真模型如图 5.5 所示，其工作原理是将 380V 工频电压经过整流桥整流得到的直流电压，通过 IGBT 逆变桥变成脉冲电压，然后经过电感滤波和变压器升压输出幅值很大的交流电，再通过整流硅堆后输出直流负高压，仿真波形如图 5.6 所示。这里可以看出由高频电源得到的输出电压基本上为标准的直流电压了，然后通过二次侧电压和电流再对系统进行控制。

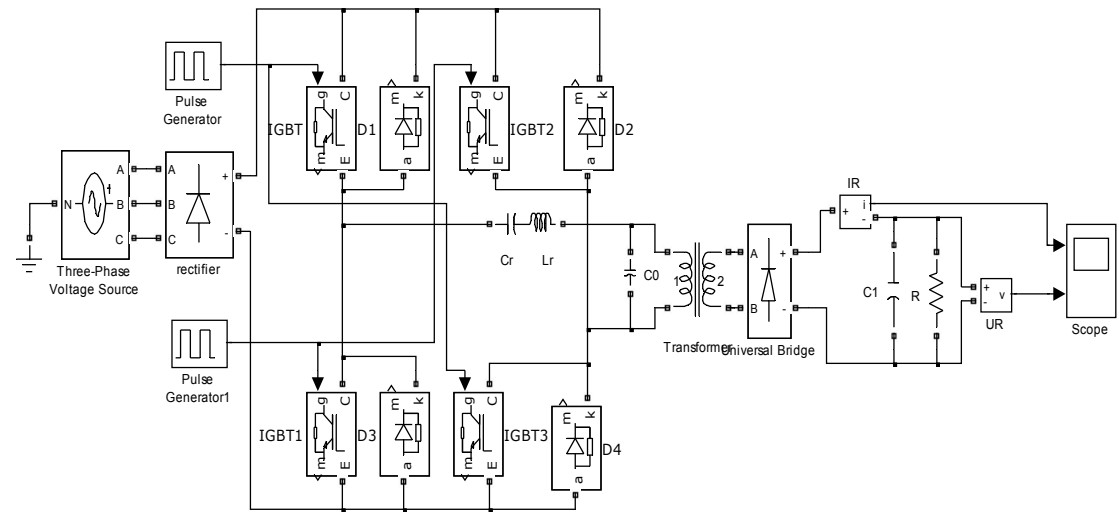


图 5.5 高频电源 Simulink 仿真模型

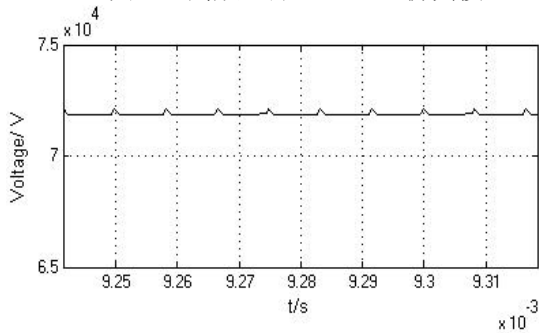


图 5.6 高频电源输出电压波形

通过对静电除尘器三种电源的仿真波形进行比较，可以从波形仿真图中可以看出，当得到相同直流电压的情况下，三相晶闸管相控供电方式相较于单相供电方式得到的输

出电压波动幅度小，更稳定可靠，此外，单相晶闸管相控供电方式供电的时候，使另外两相电处于空载状态，使供电不平衡；输出电压波动比较大，容易发生极板间火花击穿，使静电除尘效率降低。相较于单相电源的供电方式，三相供电更容易满足控制要求，电能转换率也比较高，也可以达到三相供电平衡。高频电源又比三相可控硅电源得到的直流高压更加稳定，高频电源的逆变桥采用的是全控型开关器件，开关速度比晶闸管相控快，能够及时响应闪络现象，逆变器也能够采用混合式调节办法，根据不同情况选择不同调节方式。此外，这里采用的是高频变压器，也大大减小了变压器的体积。

5.2 主电路仿真

静电除尘器供电电源的主电路应涉及三相不控整流部分、IGBT 逆变部分、移相全桥变换部分、变压器以及整流桥部分。下面给出整体 MATLAB 模型及各部分的 MATLAB 模型分析。静电除尘器供电电源的主电路模型见图 5.7，负载两端的输出电压仿真图见图 5.8。

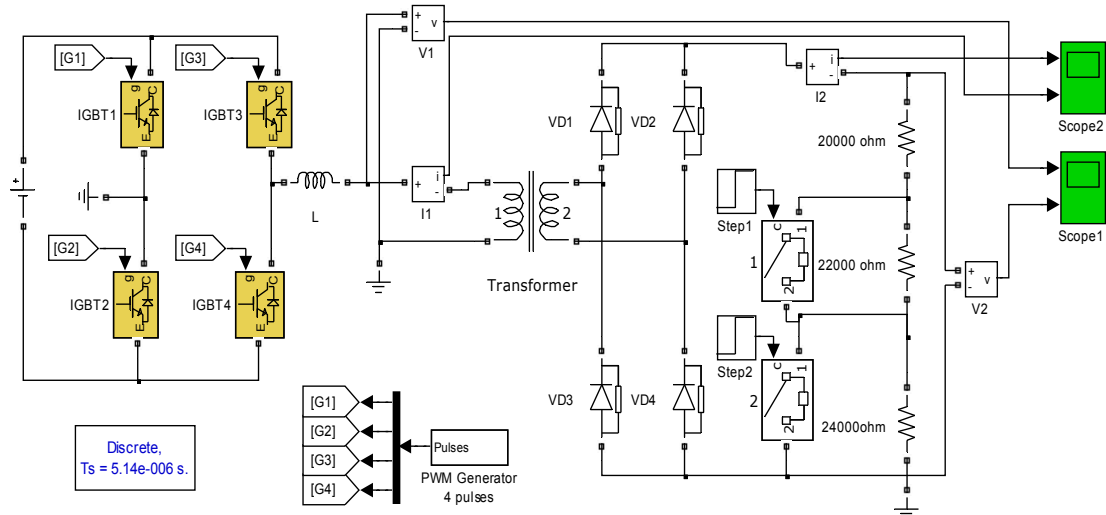


图 5.7 主电路 simulink 仿真模型

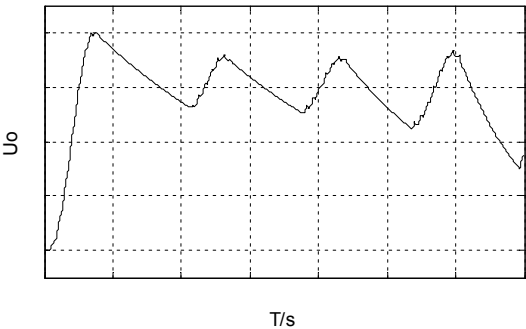


图 5.8 模拟动态负载两端的输出电压波形

为了看出动态仿真效果，主电路模型中采用 step 信号不同时间触发断路器来构成动态电阻，利用断路器接入不同阻值的电阻来模拟变化的除尘器负载，便于观察输出电压的不同变化，这里只给出了阻值增加的一种情况。

5.2.1 三相整流部分

三相整流部分是为整个主电路提供直流电压的部分，三相交流先经由二极管组成的不控整流电路整流成直流电压，然后通过滤波电容 C 三相电源电路可以输出比较稳定的直流电压给逆变桥。三相不控整流模块 MATLAB 模型见图 5.9。

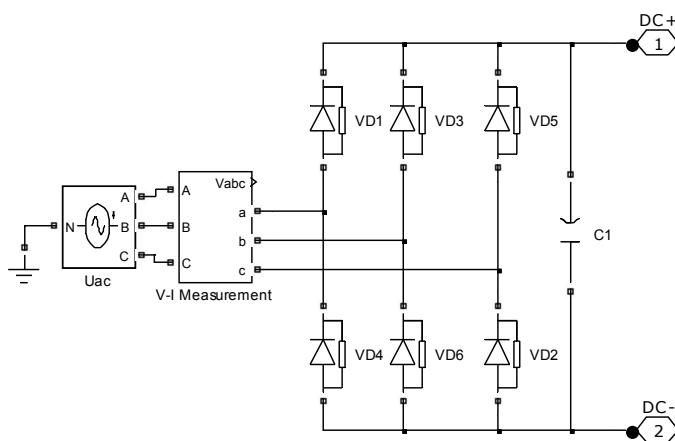


图 5.9 三相不控全桥整流模块 MATLAB 模型

图里 C 为三相供电电路里面起到滤波作用的电容，通过 MATLAB 软件对加入 C 后三相全桥整流部分模块进行模拟后，所得输出直流电压仿真图形见图 5.10。

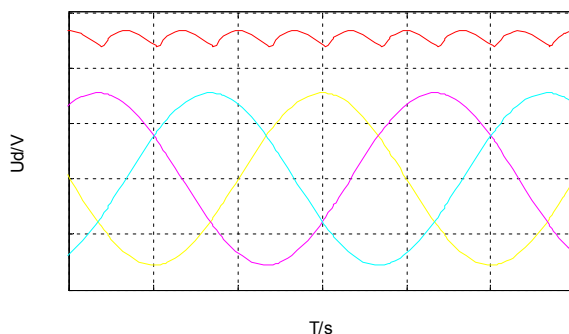


图 5.10 整流电路中并联 C 时输出电压以及三相交流的波形

5.2.2 IGBT 逆变部分

单相 IGBT 逆变部分包括 4 个 IGBT，如图 5.11 所示，其中 IGBT1 和 IGBT4 的触发脉冲一样，IGBT2 和 IGBT3 的触发脉冲一样，由三相不控全桥整流电路得到得直流电压作为信号输入，经过逆变桥后得到交流电。

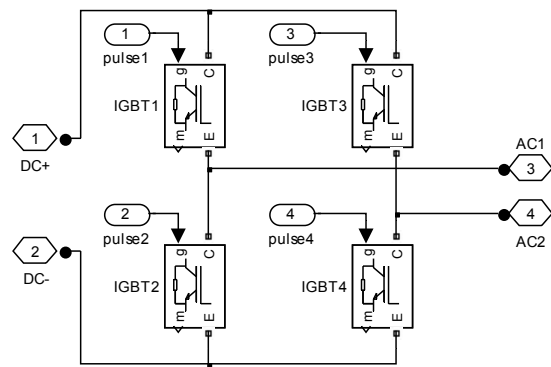


图 5.11 电源装置中单相 IGBT 逆变桥 MATLAB 模型

5.2.3 移相 PWM 生成

移相 PWM 产生模块中的输入端 In1 作为输入信号和 Triangle 模块形成得具有频率为不变值的三角波进行对比，然后产生得波形输送至 D Flip-Flop 模块里作为时钟信号对 D 触发器进行触发，该模块中 Triangle 频率需设成电源装置运行时频率的 2 倍。工作原理图如图 5.12 所示。PWM 脉冲发生器模块如图 5.13 所示。

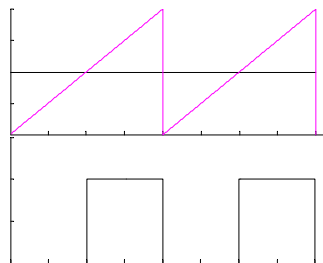


图 5.12 PWM 工作原理波形

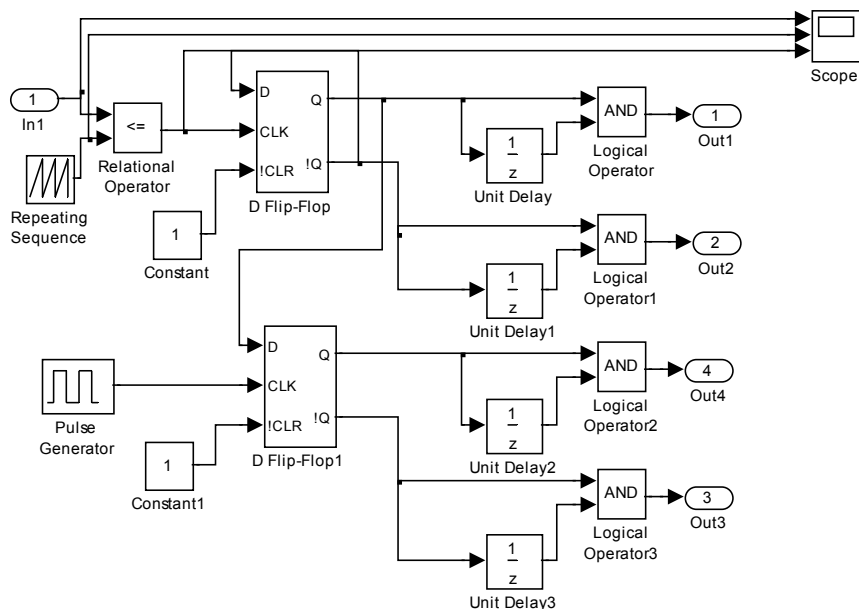


图 5.13 PWM 脉冲发生模块

作为输入端 In1 的输入信号和 Triangle 进行对比后形成得信号输送至 D Flip - Flop 模块，输出可以得到两个占空比是 50%并且具有上下互补性质的脉冲信号，再通过 Unit Delay 与 Logical Operator，即可得到死区时间是 $5\mu\text{s}$ 的脉冲信号，然后输送至桥臂 IGBT1 及 IGBT2，其中 Unit Delay 模块时间设置为工作周期的 2%即可。将 D Flip-Flop 模块输出 Q 再作为输入输送到 D Flip - Flop1 中， Pulse Generator 生产和 Triangle 频率相同的输出脉冲信号，D Flip-Flop1 的输出信号经过 Unit Delay 模块和 Logical Operator 模块，也产生死区时间为 $5\mu\text{s}$ 的脉冲，作用于超前桥臂 IGBT3 和 IGBT4。

因为移相全桥变换器是通过调节占空比来驱动逆变桥的，所以不同的占空比会影响到输出电压的波形，波形见下图。

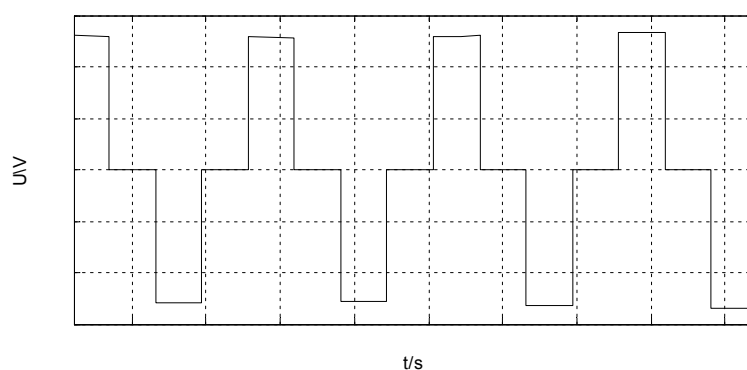


图 5.14 占空比是 0.5 的逆变桥输出电压

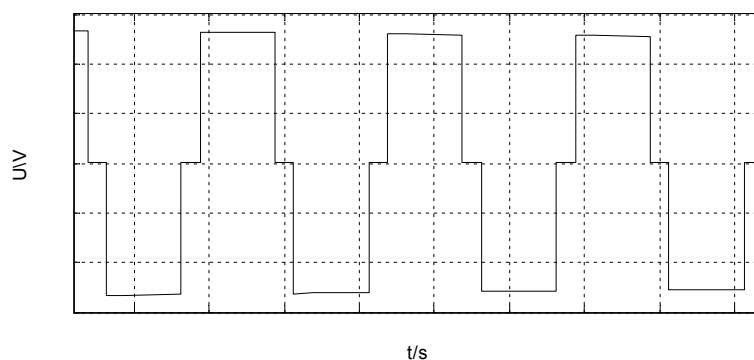


图 5.15 占空比是 0.8 的逆变桥输出电压波形

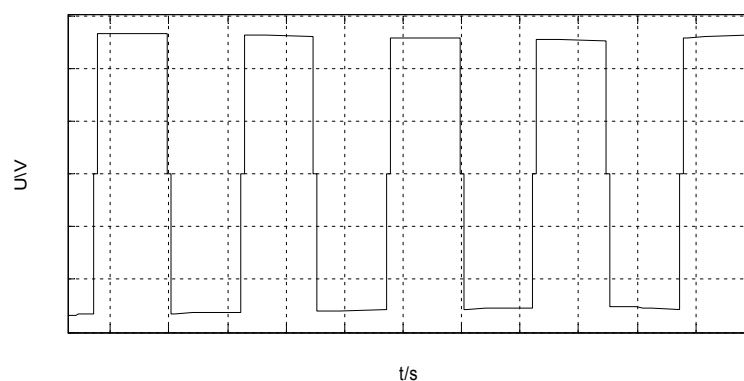


图 5.16 占空比是 0.95 的逆变桥输出电压波形

5.2.4 变压器以及副边侧整流硅堆部分

高频变压器部分和高压整流部分的仿真模块如图 5.17 所示，由 IGBT 逆变桥的输出作为输入，经过高频升压和高压整流，将高频交流电压整流为高压直流。整流后的波形如图 5.18 所示。

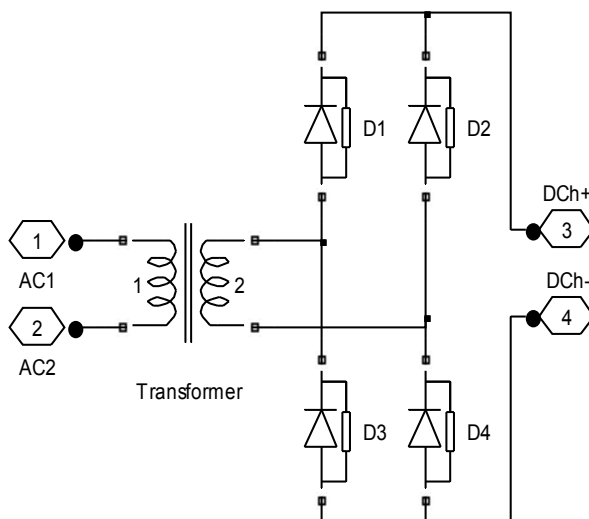


图 5.17 高压整流电路仿真模型

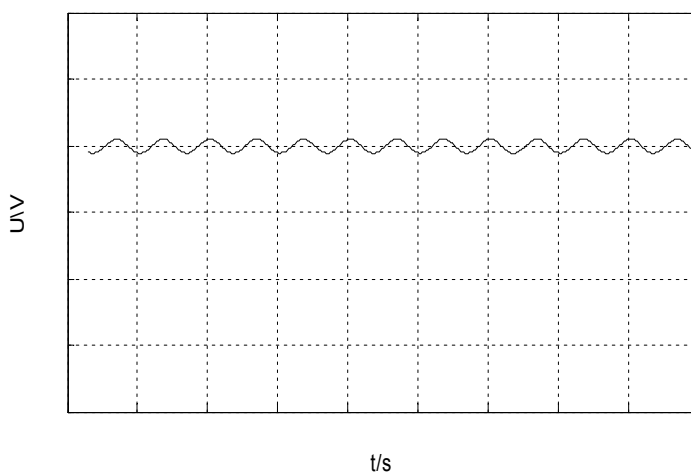


图 5.18 变压器副边输出电压经过整流后波形

5.3 控制回路仿真

5.3.1 主回路中移相全桥变换仿真与分析

以移相全桥变换器理论知识为基础展开研究，这里对移项全桥变换电路利用 MATLAB 软件搭建模型并仿真，这里充分利用变压器内部参数漏感当做是谐振电感。仿真模型见图 5.19。

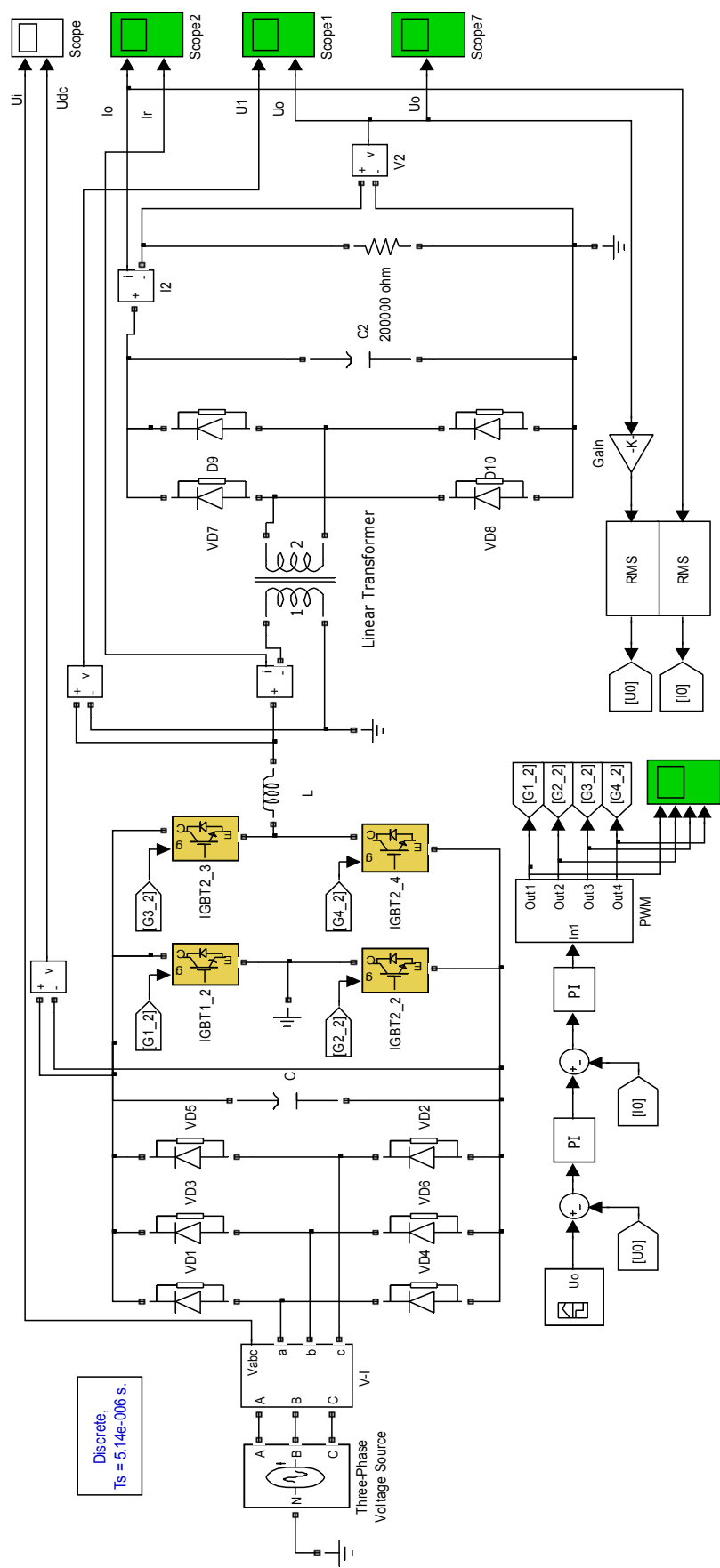


图 5.19 静电除尘系统 Simulink 控制模型

模型内采用 PI 调节得双闭环控制方式，利用调节系统中设定得电压值以调节负载两端的电压值，利用 Signal Builder 器件能够产生不同电压幅值和波形，通过仿真出得三段式电压控制策略，对整个系统负载端的输出电压的波形和幅值展开研究。文章就单环以及双环控制这两种模式搭建相应模型，然后将两个不同的输出波形对比研究。当对输入电压进行单环控制时，用 PI 控制模块进行控制，参数设置为 $K_p = 0.01$ ， $K_i = 1000$ 。输出电压的波形如图 5.20。

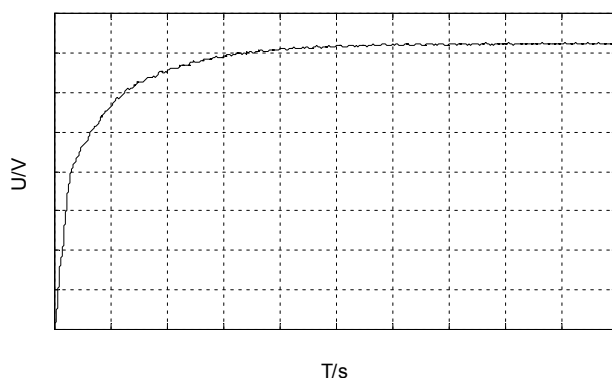


图 5.20 单环控制输出电压波形

当对输入信号进行双环控制时，电压环 PI 调节器模块比例与积分参数分别设置成 $K_p = 0.01$ ， $K_i = 0.0002$ ，电流环 PI 调节器模块比例与积分参数分别设置成 $K_p = 2$ ， $K_i = 10$ 。输出电压的波形如图 5.21。

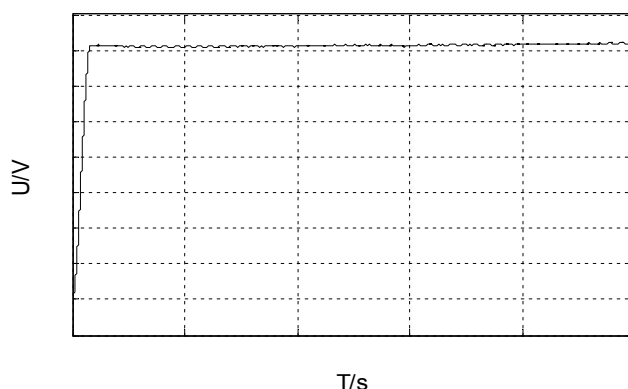


图 5.21 双环控制输出电压波形

通过仿真结果可以看出，当对输入电压进行单环控制时，输出电压在 0.6s 以后达到稳定，当对输入信号进行双环调节的过程中，负载两端电压值在 0.05s 以后趋于不变，相对于单环调节来说，调节性能更好，动态响应更快使得电压值提前趋于稳定，更能提高电源的输出特性。因为静电除尘器供电装置火花发生的频率小于 60 次/min，这里用

60 次/min 的火化率当作基准进行仿真，用 Signal Builder 元件生产值和波形不固定的电压，通过双环控制方式，仿真波形如图 5.22。

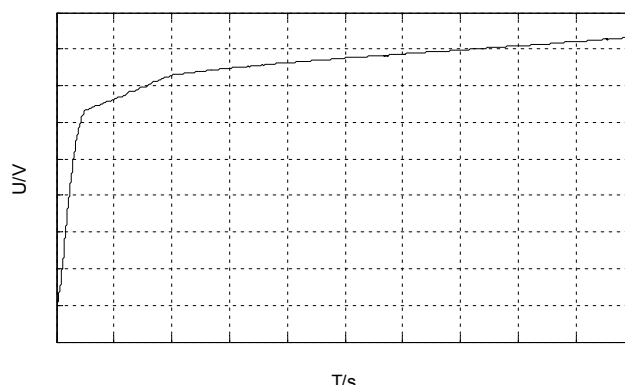


图 5.22 三段式升压仿真波形

利用三段式火花跟踪控制的仿真波形能够看出负载两端电压以 3 段不同速率上升，然后利用调节移相 PWM 驱动信号来调节系统的输出电压，进而可以基本完成对系统输出电压的三段式升压调节以及闪络电压的确定。

5.3.2 闪络判定仿真模块

静电除尘器供电装置系统 MATLAB 模型里，能够通过某一时刻让模型负载形成短路这样的办法，达到模拟极板间火花击穿现象，由于实际中不允许这样得操作，因此这里需要将等效负载设置成为一个很小的值进行仿真。输出电压判定模块如图 5.23。

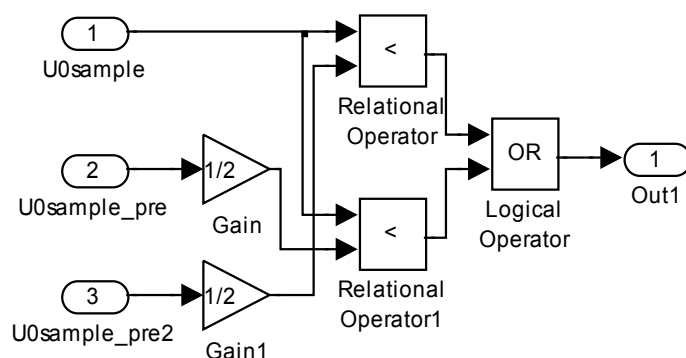


图 5.23 输出电压判定方法 MATLAB 模型

仿真中，利用延迟模块来完成对前一周期信号的采集。这里把采样信号首先输送至延时模块内，这样就能够间接地获得上一个运行周期输出电压值。在电压累加值判定模块中，通过利用互相紧接的 3 个采样周期内负载输出电压值计算累加。判定模块图 5.24 所示。

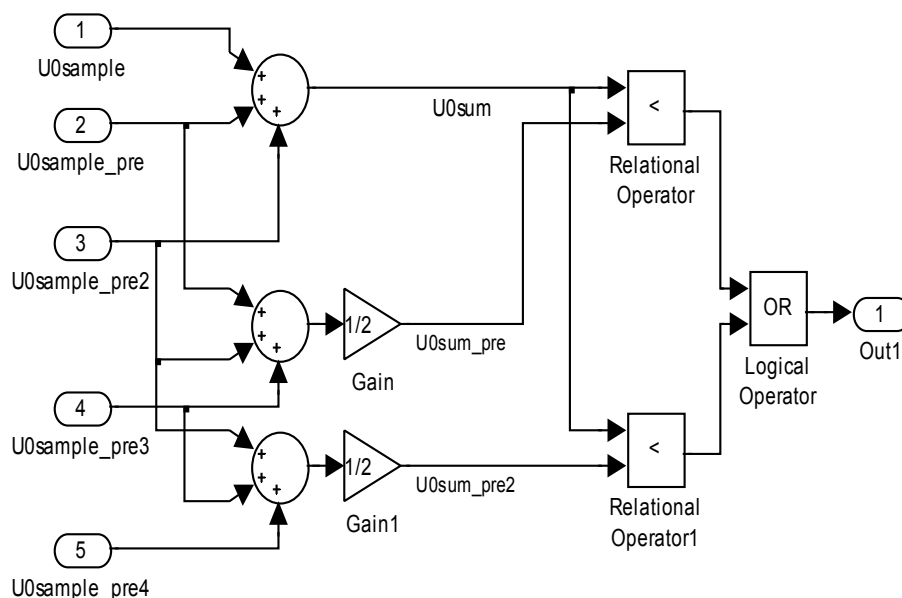


图 5.24 当前电压累加值和之前相邻周期电压累加值电压判定仿真模型

用负载两端的电流信号进行判断闪络的发生相对简单，直接把负载两端的电流值输送至对比模块和设定值对比就能够满足要求。

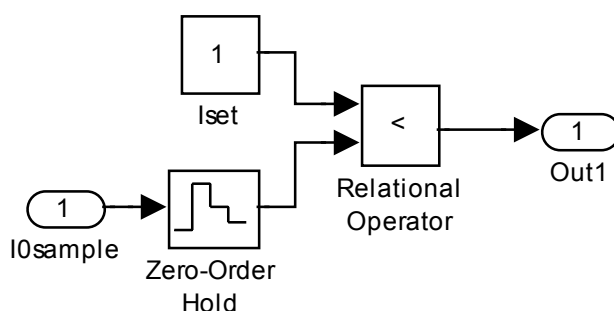


图 5.25 输出电流判定方法仿真模型

5.4 本章小结

本章使用 MATLAB 中 Simulink 对静电除尘器电源装置展开设计与研究，建立了单相、三相可控硅电源及高频电源的主电路整体模型，同时通过三种供电方式的仿真波形的对比结果展开讨论，当输出相同的电压值时，相对于单相和三相可控硅电源，三相高频电源供电方式的能耗比较低，除尘效率很高，高频电源的开关损耗也很小，可靠性好，控制灵活，抗干扰能力也比较强。然后建立出移相全桥变换电路仿真模型，也对闪络现象的判定条件建立了电压测定和电流测定不同模块，仿真了当驱动信号占空比变化过程中变压器一次侧输出的电压以及电流的仿真图，并且通过对电压基准值的变化实现

了单环和双环控制，并对结果进行了对比分析，最后对输出电压进行了三段式升压的控制，仿真出了三段式升压波形图得以实现闪络跟踪调节方式。

结 论

本文围绕静电除尘器供电方式的控制系统展开了详尽的探讨与分析，通过对静电除尘器复杂的负载特性以及除尘效率的理论分析，采用移相全桥变换器对静电除尘器的高频 IGBT 逆变供电电源的整体电路部分进行设计以及研究。静电除尘器供电电源的整体电路部分主要包含有三相不控整流部分、全控型 IGBT 单相逆变桥部分、高频升压器部分以及高压整流部分这几部分。文中采用 PWM 移相控制，对闪络判定和控制方式进行了详细的说明，给出了判定流程图。最后使用软件 MATLAB 对静电除尘供电系统的主电路和控制部分建模并仿真，本文中完成的主要工作包括：

(1) 对比电除尘器的不同种电源，选取最合适的供电方式，根据静电除尘器的原理，采用软开关技术，选取了移项全桥变换器，并详细比较了这种变换器一个周期内的工作状态和 LCC 谐振变换器的工作模态，最后对移相全桥变换电路搭建了仿真模型并通过仿真结果加以分析。

(2) 通过对静电除尘器供电电源的主电路每个部分所涉及到的器件参数的计算，对其各部分器件进行选型以及设计。

(3) 通过对静电除尘器供电电源的主电路进行单环和双环这两种控制方法的理论分析以及仿真对比，最终对控制系统选取双环控制的方法，再通过火花击穿的判定条件随时跟踪输出电压以及电流的值来对闪络进行准确地判断。

(4) 使用 MATLAB 软件对静电除尘供电电源系统各个部分的模块展开模拟仿真，选取出驱动 IGBT 逆变桥中 PWM 产生模块合适的调制方式，并对三段式火花跟踪的控制方法进行仿真与分析，并对闪络判定模块进行模型搭建。

本文的创新点在于利用软开关技术，通过对移项全桥变换器的控制来改善电源的输出特性，并提出了对火化率的控制方法，然后利用三段式火花控制方式找出精准的闪络电压值而不会使工作电压偏低，从而达到提高静电除尘器的除尘效率的目的。

文中涉及到的静电除尘设备的供电电源设定输出功率是 72kW，在实际工业生产当中，设定的功率较低。并且控制方式较为简单，未能考虑来自粉尘的其他因素对除尘效率的影响，因此，需要在优化控制策略的前提下，设计出可适应于实际除尘设备的控制程序，模拟动态的输出电压曲线。

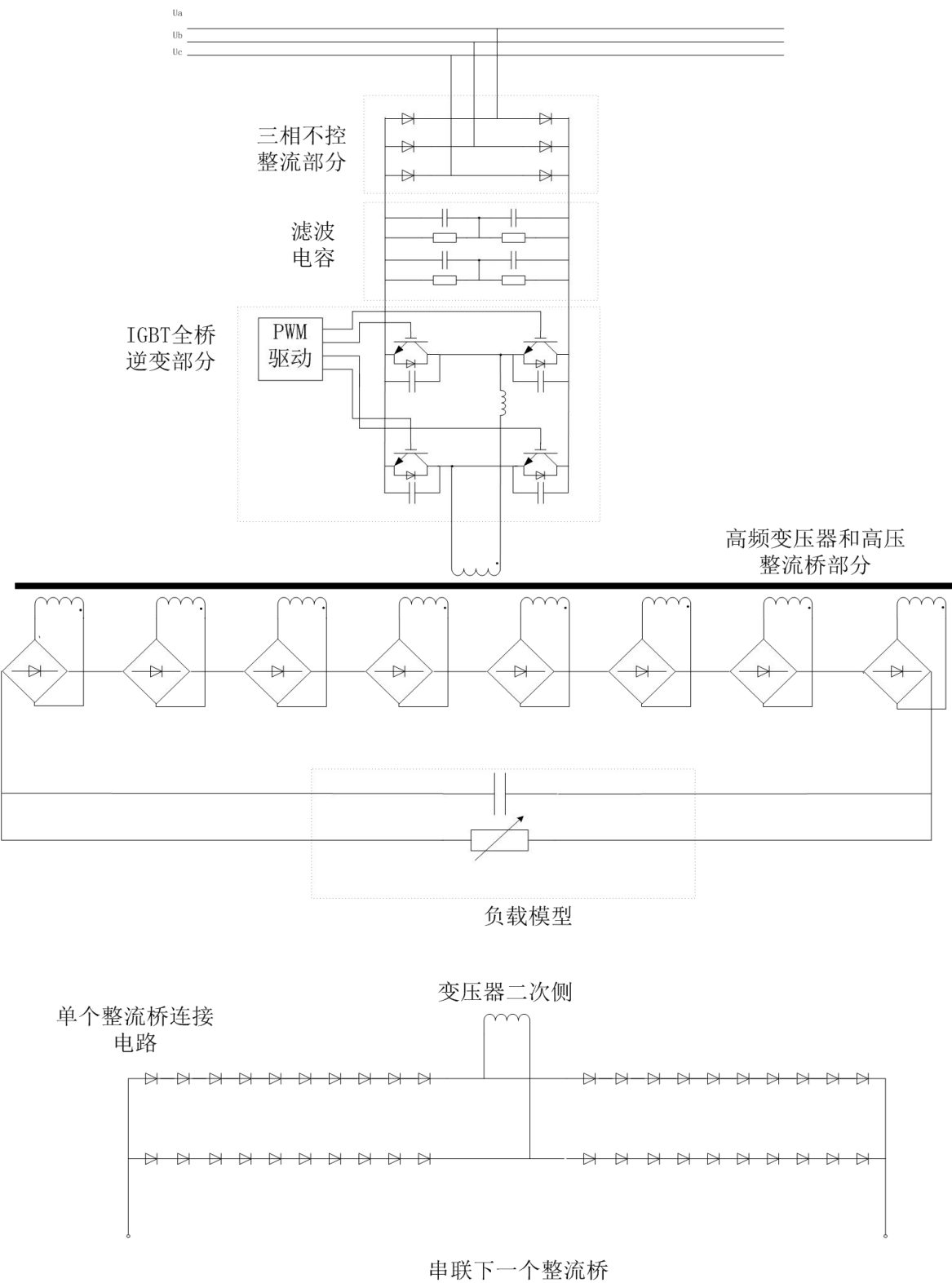
参考文献

- [1] 符晓, 朱洪顺.TMS320F2833x DSP 应用开发与实践[M].北京: 北京航空航天大学出版社 2013.128-217.
- [2] 熊国喜.基于 DSP 控制的静电除尘三相电源研究[D].硕士学位论文.华南理工大学.2011.5.
- [3] 刘宏然.基于 2812 单相变频电源的研制[D].硕士学位论文.南昌航空大学.2011.5.
- [4] 胡立强, 李鹤鸣等.基于 TMS320F281 电除尘器用高频高压逆变电源的研究[J].宇航计测技术.2007(4).
- [5] 郭荣祥, 崔桂梅.电力电子应用技术[M].北京: 高等教育出版社 2013.332-387.
- [6] 黄俊, 王兆安.电力电子技术[M].北京: 机械工业出版社 2006.114-157.
- [7] 李峰.基于 DSP 的 SPWM 变压变频电源的设计[D].硕士学位论文.湖南大学.2008.2.
- [8] Caceres Ramon O, Barbi Lvo, "Boost DC-AC converter: Analysis, design, and experimentation" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 1, Jan 1999, p131-141.
- [9] S.L.lung, L.H.Ho, H.C.Yeh, et al, DSP-based Digital Control of a PWM Inverter for Sinusoidal Wave Synthesis by Optimal State Feedback Approach, IEEE-PESC'94, pp.546-551.
- [10] Ying YuTzou, Rong ShyangQu, Shi LiangJung, Meng YueChang, High performance programmable AC power source with low harmonic distortion using DSP-based repetitive control technique, IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(4).
- [11] 罗鑫, 胡志光等.电除尘器的新技术及其展望[J].工业安全与环保.2003(20):8-10.
- [12] 胡志光.电除尘器的运行及维修.北京: 中国电力出版社.2005:1-6.
- [13] 刘胜利.现代高频开关电源实用技术[M].北京: 电子工业出版社, 2000.23-39.
- [14] 王延安.大功率高频高压 ESP 电源及其监控系统的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [15] 胡满银, 赵毅, 刘忠. 除尘技术[M]. 北京: 化学工业出版社. 2006.
- [16] 黄三明. 电除尘技术的发展与展望[J]. 工程与技术, 2007, 7:60-63.
- [17] 刘军, 官威, 石健将, 张仲超, 何湘宁. 高压静电除尘用电源调压特性的分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 344-349.

- [18] 谢友金. 电除尘器单/三相高压整流电源技术性能案例分析[C]. 中国硅酸盐学会环境保护分会学术年会论文集. 2009.
- [19] 周霞, 王斯然, 凌光, 吕征军. 三相桥式整流电路滤波电容的迭代计算[J]. 电力电子技术. 2011,45(2):63-65.
- [20] 钟和清, 徐至新, 邹云屏等. 寄生电容对串联谐振电容器充电电源特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(10):40-44.
- [21] Biela J.,Kolar J.W.. Using transformer parasitics for resonant converters-A review of the calculation of the stray capacitance of transformers[C]. Industry Applications Conference,2005,Fortieth IAS Annual Meeting, 3:1868-1875.
- [22] Filchev,T.;Cook,D.;Clare,J.;Wheeler,P.High voltage,high frequency transformer switching converter integration[C]. High Power RF Technologies(2009.IET), 2009:1-4.
- [23] Sabate J.A. ,Vlatkovic V. , Ridley R.B. , Lee F. , Cho B.H.. Design considerations for high-voltage high-power full-bridge zero-voltage-switched pwm converter[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC' 90, 1990:275-284.
- [24] 林震宇, 郭亮. 静电除尘用高频高压电源谐振参数的选择[J]. 电源技术, 2011, 10:17-24.
- [25] Imanieh M.J.M., Malekjamshidi Z.. Design, simulation and implementation of a Full Bridge Series-Parallel Resonant DC-DC converter using ANN controller[C]. Control and Communications (SIBCON), 2011 International Siberian Conference, 2011:97-103.
- [26] 赵姓斌. 串联谐振软开关高频高压静电除尘电源研究[D]. 武汉: 华中科技大学硕士学位论文. 2011.
- [27] 盛立承. 静电除尘器高频电源控制系统研制[D]. 杭州: 浙江大学硕士论文, 2010.
- [28] 官威. 静电除尘器谐振软开关高频高压电源的设计与实现[D]. 杭州: 浙江大学硕士论文, 2008.
- [29] 曲振江, 马文娟. 高压静电设备中倍压整流电路的工作状态分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 64-66.
- [30] 郝岩彪,张锡民,李志军.提高除尘电源效率的新方法[J].河北工业大学学报,2011 年 3 月,第 40 卷第 3 期:89-93.1.

-
- [31] Wang, Y. A.Xiao, D.M.; Liu, Y.L. Design of a planar power transformer for high voltage, high frequency use[C]. 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010.4:1-6.
 - [32] Soeiro T.B., Muhlethaler J., Linner J., Ranstad P. . Automated Design of a High-Power High-Frequency LCC Resonant Converter for Electrostatic Precipitators[J] . Industrial Electronics, 2013, 60(11):4805-4819.
 - [33] Juan A.Martin-Ramos,Alberto M.. pernia Power supply for a high-voltage application[J].IEEE transaction on Power electronics,2008 23(4):1608-1619.
 - [34] 刘沛然. 高压高频静电除尘电源的研究[D]. 北京: 华北电力大学硕士论文, 2014.
 - [35] 高洪, 齐虹, 陈冲. 分布参数对静电除尘用高频高压电源的影响[J]. 电气应用, 2007, 26(3):47-49.
 - [36] 王新春, 付盼, 胡庆林. 高压静电除尘电源仿真与研究[J]. 滨州学院学报, 2015, 31 (06) : 79-83.
 - [37] 孙熙. 袋式除尘技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
 - [38] 谢广润, 陈慈宣. 高压静电除尘[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
 - [39] 黄贞岚, 张忠民, 黄诗萱, 等. 静电除尘器除尘、节能效果分析[J]. 江西科学, 2008,26(1): 140-143.
 - [40] Jackson, R. M. Design, installation, and operation of electrostatic precipitators on fluid catalytic cracker flue gas applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1975, IA-11(2): 236-240.
 - [41] Parker, K. R. Effective capture of respirable-sized particulates using electrostatic precipitator technology[J]. Engineering Science and Education Journal, 2000, 9(1): 33-40.
 - [42] Mizuno, A. Electrostatic precipitation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(5): 615-624.
 - [43] 朝泽云, 徐至新, 钟和清, 等. 静电除尘用高压供电电源特性浅析[J]. 高电压技术,2006, 32(2): 81-83.
 - [44] 陈坚. 电力电子学—电力电子变换和控制技术[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
 - [45] 冯伟, 王延安, 肖登明. 电力电子电路中变压器的等效模型分析[J].上海电机学院学报, 2009,12(2) 169-172.

附录 B 静电除尘器电源装置主电路



在学研究成果

- [1] 王新春, 付盼, 胡庆林. 高压静电除尘电源仿真与研究[J]. 滨州学院学报, 2015, 31 (06): 79-83.

致 谢

在论文即将完成之际，我要对所有帮助过我的人说声由衷的感谢！文章经过指导教师老师以及我的协助指导教师王新春老师的多次指正与教导，通过对课题的学习与研究，两位老师孜孜不倦的授业精神深深地影响着我，严谨的治学态度和求实的工作作风不仅使我更高质量的完成了论文的写作，也会使得我在今后的生活与工作中受益匪浅，成为我一生的榜样。感谢王新春老师对我无微不至的关怀与深刻的教育，陪伴我度过两年的硕士生活，不仅在学习上教给我很多课本上没有的知识，锻炼我的动手能力，帮助我形成勤于动脑乐于动手的好习惯，而且在生活中教给了我很多做人的道理，一日为师，终生为父，老师们给予了我父爱般的关爱，我要怀揣着感激之情真诚的感谢陪伴我两年的老师们！

在课题完成的过程中，每当我遇到困难难以继续的时候，每当我想要放弃无法端正态度的时候，都是老师不厌其烦的叮嘱和教导，帮都是同学们热情的帮助，助我攻克一个又一个难题，我发自肺腑地对指导过我的老师门以及同班同学说声谢谢。同时也要感谢实验室内的各位师兄们对我在学习和生活上的帮助和鼓舞，也感谢班级中一起并肩作战的同学们，你们的支持和鼓励，是我在艰涩的科研之路上绚烂的繁花！让我的硕士生活五彩缤纷，充满美好的回忆。

借此机会对百忙之中给本文章进行评阅的诸位专家教授门奉上我最诚挚的感激之情，谢谢你们能够给我的文章留下仔细认真的审阅意见以及教育指导！

最后，感谢养育我二十多年的父母，能够支持我在学习的道路一直前行！感谢我的父母陪伴我度过人生中的每段日子，教会我人生中最珍贵的道理！