

分 类 号: TM352

单位代码: 10422

密 级: 公开

学 号: 201212784



山东大学

硕 士 学 位 论 文

论文题目: 风力发电开关磁阻发电机的研究

Investigation of Switched Reluctance Generator
in Wind Power

作 者 姓 名	张泽慧
学 院 名 称	电气工程学院
专 业 名 称	电机与电器
指 导 教 师	徐衍亮 教授
合 作 导 师	

2015 年 5 月 10 日

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：_____ 日 期：_____

关于学位论文使用授权的声明

本人同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的印刷件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：_____ 导师签名：_____ 日 期：_____

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题背景和意义.....	1
1.2 风力发电的发展和现状.....	1
1.3 风力发电技术研究现状.....	2
1.4 开关磁阻发电机在风力发电系统中的适用性.....	4
1.5 开关磁阻发电机的研究现状.....	6
1.6 本课题的研究内容与研究重点.....	7
第 2 章 开关磁阻发电机的基本结构与运行原理.....	9
2.1 开关磁阻发电机的基本结构与原理.....	9
2.1.1 开关磁阻发电机系统的基本结构.....	9
2.1.2 开关磁阻发电机的基本原理.....	10
2.2 开关磁阻发电机励磁模式.....	12
2.3 开关磁阻发电机的解析分析.....	13
2.3.1 开关磁阻发电机电感的线性分析.....	13
2.3.2 相绕组电流解析.....	14
2.4 开关磁阻发电机系统的控制方式.....	18
2.5 本章小结.....	20
第 3 章 外转子开关磁阻发电机的模型建立.....	21
3.1 引言.....	21
3.2 开关磁阻发电机基于 Matlab/Simulink 中的模型建立	21
3.2.1 功率变换器模块.....	22
3.2.2 开关磁阻发电机模型.....	23
3.2.3 转子角度位置输出模块.....	24
3.2.4 电流斩波控制模块.....	25
3.2.5 励磁区间控制模块.....	25
3.2.6 Matlab/Simulink 建模仿真波形	26
3.3 开关磁阻发电机基于 Matlab/Simulink 模型的有限元法验证	26
3.3.1 开关磁阻发电机模型的建立.....	27
3.3.2 开关磁阻发电机外电路的搭建.....	28
3.4 本章小结.....	30
第 4 章 开关磁阻发电机输出特性仿真研究.....	31

4.1 起励电压对输出电压影响.....	31
4.2 开通角和关断角对输出电压的影响.....	32
4.3 电机转速对输出电压的影响.....	33
4.4 稳压电容对输出电压的影响.....	34
4.5 开关磁阻发电机系统缺相故障仿真分析.....	35
4.6 本章小结.....	36
第 5 章 开关磁阻发电机控制系统的硬件和软件设计研究.....	37
5.1 系统硬件电路设计研究.....	37
5.1.1 功率变换电路.....	38
5.1.2 驱动电路.....	39
5.1.3 电流检测电路.....	41
5.1.4 冲击电流抑制.....	42
5.1.5 位置检测.....	43
5.2 系统软件设计.....	44
5.2.1 软件部分总体结构.....	44
5.2.2 功能模块设计.....	45
5.3 外转子开关磁阻发电系统实验及分析.....	48
5.3.1 测试装置介绍.....	49
5.3.2 位置信号检测.....	50
5.3.3 功率元件测试.....	51
5.3.4 外转子开关磁阻发电系统的发电性能测试.....	52
5.4 本章小结.....	53
第 6 章 总结与展望.....	54
6.1 全文工作的总结.....	54
6.2 下一步工作展望.....	55
参考文献.....	56
附录：外转子开关磁阻发电机系统控制软件主程序.....	73
致谢.....	73

CONTENTS

ABSTRACT IN CHINESE.....	I
ABSTRACT IN ENGLISH	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Significance	1
1.2 Development of Wind Power Generation	1
1.3 Research Status of Wind Power Generation Technology	2
1.4 The Applicability of SRG in Wind Power Generation System.....	4
1.5 The Research Status of SRG.....	6
1.6 Contents and Key Point of this Research.....	7
Chapter 2 The Basic Structure and Operating Principle of SRG.....	9
2.1 The Basic Structure and Principle of SRG	9
2.1.1 The Basic Sstructure of SRG System	9
2.1.2 The Basic Principle of SRG	10
2.2 Two Excitation Mode of SRG.....	12
2.3 Analysis of SRG.....	13
2.3.1 Linear Analysis of SRG's Inductance	13
2.3.2 Analysis of the Phase Winding Current	14
2.4 SRG's Control Modes	18
2.5 Chapter Summary	20
Chapter 3 Outer Rotor SRG Generation System Model.....	21
3.1 Chapter Introduction	21
3.2 Motor Model in Matlab/simulink.....	21
3.2.1 Power Converter Module.....	22
3.2.2 SRG Motor Module	23
3.2.3 Angular Position of Rotor Output Module.....	24
3.2.4 Current Chopping Control Module.....	25
3.2.5 Excitation Interval Control Module	25
3.2.6 Modeling and Simulation Waveform in Matlab/simulink	26
3.3 Finite Element Simulation of Outer Rotor SRG System	26
3.3.1 Motor Model in Ansoft/Maxwell 2D	27
3.3.2 External Circuit Module	28
3.4 Chapter Summary	30
Chapter 4 SRG's Output Simulation.....	31

4.1 Influnce of Excitation Voltage on Output Voltage	31
4.2 Influence of Opening Angle/Off angle on Output Voltage	32
4.3 Influence of Motor Speed on Output Voltage	33
4.4 Influence of Regulators Capacitance on Output Voltage	34
4.5 Phase Fault Simulation	35
4.6 Chapter Summary	36
Chapter 5 Design of Hardware and Software in SRG Control System	37
5.1 Hardware Design	37
5.1.1 Power Conversion Circuit.....	38
5.1.2 The Driving Circuit.....	39
5.1.3 The Current Detection Circuit	41
5.1.4 Influence of Current Suppression Circuit	42
5.1.5 Position Detection Circuit.....	43
5.2 Software Design.....	44
5.2.1 Overall Structure of Software	44
5.2.2 Functional Module	45
5.3 Experiments and Experimental Results	48
5.3.1 Testing Device	49
5.3.2 Test of Position Signal	50
5.3.3 Test of Power Component.....	51
5.3.4 Test of Power Performance of Outer Rotor Switched Reluctance Generator.....	52
5.4 Chapter Summary	53
Chapter 6 Summary and Prospect.....	54
6.1 Summary	54
6.2 Prospect.....	55
REFERENCES	56
APPENDIX: Main Program of the Control Software for the External Rotor Switched Reluctance Generator.....	73
ACKNOWLEDGEMENT	73

摘要

随着经济的发展和科技的进步，资源和环境问题开始凸显。清洁的可再生能源成为能源需求的方向，风能具有无污染、可再生的优点，因此越来越受到人们的重视。在这一背景下，各国科学界投入大量精力研究风力发电技术。风力发电既可以有效地利用自然资源，又不会产生污染环境的附加物，是一种理想的发电方式。本课题分析了风力发电的发展现状和前景，介绍了风力发电技术的研究现状。对不同风力发电系统的特点进行比较，明确了开关磁阻发电机用于风力发电系统的优势。

开关磁阻电机作为一种新类型的发电设备，具有结构简单、成本低廉、耐高温、容错能力强等优点，且具有良好的低速直驱性能，在低速直驱风力发电中具有良好的应用前景。本文围绕开关磁阻发电机（Switched Reluctance Generator, SRG）在小型直驱风力发电中的应用，进行理论分析、仿真研究，并在自主开发的开关磁阻发电机系统实验平台上进行了研究工作。

首先，阐述了开关磁阻发电机的基本结构和运行原理，对发电机励磁和发电过程进行了详细的解析分析，重点研究了相电流的解析表达式。介绍了发电机自励发电和他励发电两种发电励磁模式。在原理分析的基础上总结了开关磁阻发电机的控制方式。

其次，基于电磁场有限元分析得出的开关磁阻发电机不同定转子位置处的磁化曲线，考虑电机铁芯饱和的影响，采用 Matlab/Simulink 软件环境建立了外转子开关磁阻发电机的非线性数学模型。详细分析了模型每个模块的结构与功能。同时采用电磁场的有限元方法对外转子开关磁阻发电机的发电过程进行了仿真，以验证基于 Matlab 软件所建仿真模型的正确性。

再次，基于前述建立的开关磁阻发电机仿真模型，对电机的稳态及动态性能进行了仿真实验。在分析的电机的控制策略和输出特性的基础上，研究起励电压、开通角、关断角、转速和外接稳压电容等控制参数对开关磁阻发电机发电过程及稳定发电电压的影响；同时对开关磁阻发电机系统的定子绕组缺相故障进行了仿真分析，以改善开关磁阻发电机的发电容错能力。

最后，基于前述的仿真研究结果，研制出外转子开关磁阻发电机的驱动控制

系统实验样机，并在实验平台上并进行了相关实验研究。该系统以 TI 公司的 TMS320F2812 控制芯片为核心。控制系统的设计包括硬件部分和软件部分，硬件部分包括功率变换器、位置传感器及控制器的设计；软件部分主要是 DSP 控制程序。这两个部分的设计相互配合，共同控制开关磁阻发电机系统。在开发的外转子开关磁阻发电机系统实验台上进行相关信号测试和器件的功能测试，并进行发电实验。通过实验结果验证理论研究和仿真研究的结论，以及所开发实验平台的正确性。

关键词：风力发电；开关磁阻发电机；Matlab/Simulink；建模与仿真；DSP

ABSTRACT

With the development of economy and technology, power and environment problems are increasingly urgent. Renewable energy becomes a future trend. Wind power gets more attention as one of the clean and renewable energy. Under this background, wind power technology has become a research focus and an increasing number of countries devote to wind power research. Wind power generation uses nature resources efficiently as well as not pollutes the environment, so it's a kind of ideal power generation sources. This paper introduces current state and prospect of wind power generation, compares different types of wind power generation system, makes sure the advantage of using SRG (Switched Reluctance Generator) in wind power generation.

SRG, as a kind of new power generation equipments, has characteristics of simple structure, low cost, high-temperature resistance, fault-tolerant ability and good low speed direct-driven performance. It has great practical value in low speed direct-driven wind power generation. This paper mainly focuses on the application of SRG in wind power generation, which includes theoretical analysis and simulation research. Main work of this paper are listed as following.

Firstly, this paper introduces SRG's basic structure and operation principle, analyses the excitation and power generation process of SRG in detail, especially the expressions of phase current. Self excited SRG and separately excited SRG are compared. Based on the theoretical analysis, control methods of SRG are summarized.

Secondly, magnetization curves corresponding to different stator and rotor position are achieved by using finite element method in electromagnetic field. According to these curves, linear mathematical model of exterior rotor switched SRG is built based on Matlab/Simulink. Every module's function and structure is studied in detail. By using , the simulation model of exterior rotor switched SRG is verified. Exterior rotor switched SRG's power generation process is simulated as well, which is

used to verify the correctness of Matlab/Simulink simulation model.

Then, steady performance and transient performance of exterior rotor switched SRG are simulated based on the simulation model. Control strategy and output characteristics are studied. SRG's power generation process and voltage stability might be influenced by some factors, such as exciting voltage, turn-on angle, turn-off angle motor speed and stabilizing capacitor. Influences from these factors are discussed. Meanwhile, SRG's winding fault and winding phase fault are simulated, which helps to develop fault-tolerant ability.

Finally, based on the simulation work, driving and controlling sample system of exterior rotor switched SRG is developed. Experiment platform is built and some research is finished. TMS320F2812 chip from TI company is the core of the designed driving and controlling system. Design of this system includes hardware circuit design and software design. Hardware design includes power converter, position sensor and controller circuit design. Software design mainly concentrates on DSP controlling program development. Hardware circuit and controlling software constitutes the driving and controlling sample system of exterior rotor switched SRG and controls the power generation system together. Related signals test, function test and power generation experiment are finished based on the exterior rotor switched SRG power generation platform. The correctness of theoretical research and developed experimental platform is verified based on the research results.

Key Words: Wind Power Generation; SRG; Matlab/Simulink; Modelling and Simulation; DSP

第 1 章 绪论

1.1 课题背景和意义

随着科技的进步和经济的发展,全球资源和环境问题开始凸显。无节制地开采使石油储量大幅减少,化石燃料的大量使用产生的废气废渣对自然环境产生严重的污染和破坏。温室效应、大气污染已影响到人类日常生活;煤炭、石油资源短缺的危机已经开始显现,人类开始面临来自能源利用和环境保护两方面的压力。自从 1973 年发生世界性的能源危机以来,西方发达国家投入了大量经费以寻求无污染可再生的能源替代化石燃料,在这一背景下,各个国家相继研制新技术,开发现代风力发电机组,风力发电既可以有效利用自然资源,又不会产生污染环境的附加物。本课题详细分析了世界风力发电现状及风电技术发展前景,比较了各类风力发电机的特点,确定了开关磁阻发电机在风力发电应用中的优越性。开关磁阻电机由于结构简单、成本低廉,且具有良好的低速直驱性能,在低速直驱风力发电中具有重要应用价值。

1.2 风力发电的发展和现状

从 20 世纪 70 年代石油危机以后,欧美国家政府投入了大量的资金和精力寻找可替代能源,风能作为一种清洁、无污染的自然资源受到重视,由此风力发电开始飞速发展。联邦德国自开始开发风能,投资逐年增高,到 20 世纪 80 年代末时用于风能开发的拨款高达 6800 万美元;70 年代末,丹麦政府投资建立小型风轮机试验中心以利用本国丰富的风能;20 世纪 80 年代初美国安装风电机组,总装机容量约为 3 MW,到 80 年代末,大型风轮机大范围应用,全球总装机容量达到 2 GW。风能的开发利用势头越见强势,如今风力发电在这些发达国家当中已被广泛应用,尤其是德国、丹麦、西班牙,是世界上风力发电发展最好的三个国家。由于他们有丰富的风能资源,风力发电技术发展较早,现在风力发电已经是电网中重要的能量来源。按照风力发电在总的能源供应中所占的比例,丹麦以 20%居世界首位^[1-5]。美国现在每年新增发电机组容量中,有超过 40%是风电装机容量。从能源的角度来看,风力发电势头强劲。美国劳伦斯.伯克利国家实验

室 (LBL) 的报告中预测: “从 2009 年起直至 2030 年, 美国预期的新增发电能力将有接近 60% 来自风电, 尽管未来的增长趋势难以预测, 但很明显, 美国的风电行业能够满足很大一部分的新增电力需求^[6]。”

我国和世界上风能发电发达国家相比利用风力发电起步较晚, 20 世纪 80 年代开始到 20 世纪末主要学习国外先进风力发电设备核心制造技术, 建设了基础的风电场。2000 年开始, 我国进入自主研发新的风力发电产品的阶段, 发展初期研制的风机主要为小型风电机组, 后来逐渐开展大型的海上风力发电项目。目前有技术成熟的风机类型已远销海外。随着我国引进和开发了大型风力发电机组, 在全国各个风能丰富的地区, 如内蒙古、新疆达坂城、山东荣城、东北的营口和富锦等地, 已经建立由多台风电机组成的风电场, 并入地区电网供电。根据中国风能协会统计数据可知, 2012 年我国风电新增装机容量为 1296 万千瓦, 2013 年新增装机容量为 1610 万千瓦, 较 2012 年提高 24%, 我国目前累计装机已突破 9000 万千瓦, 16.1GW 的总装机超过了市场预期的 15GW^[7]。

风力发电与常规能源发电方式比较, 装机规模灵活, 造价低, 运行维护简单, 在经济上和实用性等方面具有很多优势。虽然在世界范围内, 目前的风力发电量不足全部发电量的 1%, 但随着风力发电技术的不断改进以及人类环保意识的不断增强, 风电将对新能源发展和全球节能减排做出巨大贡献。1999 年 10 月 5 日, 欧洲风能协会的一项国际能源研究报告中提到: 到 2020 年, 风能可提供世界电力需求的 10%。我国电力发展“十一五”发展纲要中也作出了预测, 我国的风电发电量将占世界风电总量的 14%^[8]。

1.3 风力发电技术研究现状

风的特性有随机性, 风向和风速都是每时每刻变化的, 因此利用风力发电与利用化石燃料发电在技术上有不同的研究重点: 如功率调节、变速运行、变速/恒频问题、变桨距问题等。

风力发电机组首先将动能转化为机械能, 接着由机械能转化为电能, 经过两个能量转换过程, 将电能输送进电网。风力发电机及其控制系统承担了第二个能量转换过程, 但是他不仅影响到机械能转化为电能这一过程的能量转换效率和发出的电能质量, 同时也影响到风机的结构和运行效率。因此, 提高风力发电技术,

使发电系统更加可靠的运行，为电力网络输送高电能质量的电能，是推动风力发电发展最重要的工作^[9-11]。

风力发电事业的发展，是建立在风力发电技术进步基础上的。风力发电技术按照电机运行方式来分，主要有恒速恒频风力发电技术和变速恒频风力发电技术两大类。恒速恒频风力发电系统最核心的技术是定桨距失速控制技术，发电机一般选择同步电机或鼠笼异步电机。这种系统的工作特点是发电机的转速需要保持在恒定的值，输出电压和频率恒定，运行范围较窄。变速恒频风力发电系统主要采用变桨距角调节技术和变速恒频发电技术，可在较宽的风速范围内使最佳叶尖速比维持在一个近乎恒定的数值，可最大程度的利用风能，在高效率工作方式下运行，提高了风力机的运行效率和系统的稳定性。变速恒频不仅能提高系统对风能的利用率，也可以实现无电流冲击的并网，也是风力发电中着力发展的重要技术。下文对变速恒频发电技术做详细的介绍。

风能具有随机性、不可控性、不定向性的特点。风力机在最佳运行速度下对风能的接收效率最高。一般恒速恒频发电技术使风力发电机组运行在最佳转速下，并保持恒定速度，获得恒定频率。而变速恒频发电方式则可以接受变速的风能，转速随风速实时变化，通过一定的控制方法得到恒定的频率。

变速恒频发电作为一种新型风力发电技术，可以通过调节发电机电流的幅值和相位的方式，或直接通过变桨距控制技术，实现转速的调节。进而将微机信息处理、矢量变换控制等控制策略引入发电机控制之中，通过控制电力电子变换装置得到恒频电能^[12-14]。不仅能尽可能高的实现风能转换效率，也能在一定控制策略基础上抑制谐波，调节系统的有功功率和无功功率，提高风电并网的稳定性。尽管风电转换装置中应用了较复杂的电力电子器件增加了系统的成本，但是在大型风力发电场中占总成本比例很小。因此变速恒频技术对于发展风力发电是一种高度可行性的关键技术。为了更充分利用风能，应对变速恒频技术进行更深入的研究。

变速恒频发电可以通过多种发电系统实现：直驱型风力发电系统、交流/直流/交流系统、双馈发电机系统、开关磁阻发电机系统等，这些发电系统或利用发电机结构特点通过改变控制方式实现变速恒频；或是通过发电机发电，经电力电子装置转换电能，以实现变速恒频。可以根据需求对风电场选择适用的发电系

统。为更好得利用风能，应加大对变速恒频技术的发展。

1.4 开关磁阻发电机在风力发电系统中的适用性

在风力发电系统中选择发电机方案时，有几个方面需要重点考虑：一是将变化的风能转换为频率恒定、幅值恒定可并网发电的交流电或变换为直流电能储存在蓄电设备中。二是提高风能转换为电能的效率，从而减少发电成本。三是安全的并入电网或储能系统联合运行，为用户提供稳定的电能^[15]。

在变速恒频风力发电场合中，目前可供风力发电机组选型的发电机类型主要有：异步发电机、双馈异步发电机、同步发电机、开关磁阻发电机等。下面分别对每种电机的特点进行分析：

1. 异步电机

异步电机主要是笼型异步电机，既便宜，又结实耐用。若将笼型异步风力发电机直接并入电网，那么电网将为电机提供其所需要的无功功率。使用笼型异步电机的风力机多为定速风力机，为了扩展适用风速范围、提高风能利用率，往往通过改变电机的磁极对数来获得第二个额定工作转速等级。

2. 双馈异步发电机

双馈异步发电机的工作方式是对绕线式转子异步电机用串极的方式调节转差率。双馈异步电机通过逆变器与转子回路实现能量的交换。该类电机可以变速工作，不过需要使其容量大概为装机总容量 1/3，而且需用速度上下限比值为 2:1 的逆变器。

受到现有的电机制作工艺的限制，电机的磁极对数一般不超过 4 对，可选速度变比少。因此异步电机必须配合齿轮变速器共同工作在风力发电机当中。

3. 同步发电机

同步电机的磁通是通过永磁体或者励磁绕组来产生的。如果使用励磁绕组，电机的无功功率和定子端电压都可以随意调节而不依赖于电路中的负载大小。这种类似于理想电源的特性使得同步电机特别适用于电器孤立系统当中。如果在变速风机上使用同步电机，那么必须采用逆变器把电机和电网完全隔离开，所有功率需要有逆变器来传送。同步电机可以安装多对磁极，因而可以用在直驱型风力发电机上^[16]。

4. 开关磁阻发电机

与以上电机相比，开关磁阻发电机作为一种新型风力发电机，有以下特点更适用于风力发电系统中^[17-19]：

（1）开关磁阻发电机有自励和他励两种励磁模式，励磁电源都是用直流电压，电机发出的电能为直流电。电机可调参数多，可通过调节不同的参数得到需要的输出电压和电流。若将输出的直流电能通过逆变器处理，可得到幅值恒定、频率恒定的三相交流电，以实现并网发电。

（2）开关磁阻发电机本体结构简单，在电力电子器件构成的功率变换器的控制下选择运行方式。通过改变相绕组导通角度、对电流斩波等控制方式，可以实现比较复杂的控制策略。开关磁阻发电机能够在较宽的速度范围内运行，提高对不同风速下的风能利用率。此外，功率变换器的开关器件与绕组相串连，不会发生直接击穿事故故障，安全可靠。

（3）开关磁阻发电机为双凸极结构，转子上无励磁绕组，因此没有铜耗，提高了发电效率。SRG 发电系统能够自同步运行，因此即使在低频运行状态，也不会出现低频振荡的问题。不管风速或高或低，通过优化的控制策略，可以控制 SRG 在不同风力的驱动下都能保证发电效率最优。在结构上，SRG 风力发电系统可省去普通风力发电系统中必须的的齿轮箱，不仅减少了成本，也降低了系统的故障风险，这也正是未来风力发电技术研究热点。

（4）开关磁阻发电机各相相间耦合少，即使在某一相绕组或某几相绕组缺相的故障状态下，也能保证电能的供应，具有较好的容错能力。另外开关磁阻发电机还具有结构坚固、成本低廉等优点，适用于恶劣的工作环境，如野外作业的风力发电场^[20]。

（5）开关磁阻发电机可通过整流逆变过程向电网输入高质量的电能，也可以将直流电能储存进储能装置。在自励模式下，只需较小的励磁电压使电机起励，开关磁阻发电机就可以发出稳定电能。如果 SRG 与蓄电池构成一个系统，在风力充足时，开关磁阻发电机励磁电压由蓄电池提供，电机发电给负载供电，并将多余的电能由蓄电池充电转化成化学能储存起来。当风力不足时，SRG 无法发出足够的电能供给负载，此时蓄电池释放出电能，给负载供电。这一过程体现了开关磁阻发电机励磁过程和发电过程分时进行的优势。

由上文可以看出，开关磁阻发电机在风力发电领域中具有重要的研究价值。

1.5 开关磁阻发电机的研究现状

国内外从 19 世纪 40 年代开始对开关磁阻发电机展开研究。在美国，为满足对航空、航天电源的需求，USAF (United states Airforce) 和 NASA 支持 GE、Sundstrand 公司对开关磁阻起动/发电机直流发电系统做了大量研究，研制出系列试验样机。主要是 30kW^[21]和 250kW^[22-24]两种规格样机。30kW 开关磁阻电机起动/发电机系统中电机采用了 6/4 极结构，单通道发电。功率密度为 3.89kW/kg，转速高达 52000r/min。250kW 开关磁阻起动/发电机系统电机采用了 12/8 极结构，双通道发电。系统过载能力为 330kW，功率达到了 5.3kW/kg，电机最高转速为 22224r/min，效率达 91.4%。

美国一直在研究和改进开关磁阻电机发电机的发电性能和控制方式，改进了 30kW 开关磁阻起动/发电系统，新的发电系统采用无位置传感器的控制方式。开关磁阻电机仍为 6/4 极结构，改进后的起动/发电系统效率与原系统相近。发电机的转速可根据需要在 27000r/min 到 46000r/min 之间调整。另外，对该改进系统也尝试用滑模控制观测器实现对开关磁阻电机的无位置控制。文献[25]表明，250kW 开关磁阻发电机采用磁轴承支撑，其转速可达到了 42000r/min。

开关磁阻电机起动/发电系统是几大航空公司未来飞机起动/发电系统的重要发展方向。由 Lockheed Martin 公司研制的欧美新一代主战机型，联合战斗攻击机 F-35，采用内置式的高转速的开关磁阻起动/发电机作为其主电源系统。NASA 和 USAF 在航空航天电源系统和高速驱动系统方案的设计中，已将 SRM 作为优先发展的系统之一^[26-30]。

国内对开关磁阻发电系统的研究较欧美国家相比略晚，开始于在二十世纪八十年代，被国家列为“七五科研规划项目”。经过多年对开关磁阻发电机进行了广泛的研究，取得了一系列成果。主要的研究方面在开关磁阻电机结构、基本理论原理、励磁模式、控制策略、发电电能质量及无转子位置传感器技术控制策略等^[31-33]。

各高校对 SRG 在工程应用的研究做出了很多工作。南京航空航天大学开发了两种容量试验样机，3kW 和 6kW。基于这两种规格电机设计了比较成熟的系

统仿真软件，可对系统进行稳态仿真和动态仿真，进而进行优化设计^[34]。江苏大学对车辆用 SRG 进行了深入的研究。自行设计和研制了结构为 12/10 的柴油机用 1kW 的样机系统，可用于电动车起动/发电开关磁阻发电系统。西北工业大学对 SRG 结构设计、控制方法、高速性能及功率变换器结构选择等方面进行了一系列研究，并研制出 4kW 的样机系统^[35]。西工大的研究项目“开关磁阻高压直流与恒频交流混合起动/发电系统”为国家“九五”科研项目。在研究人员的不断努力下，目前国内已研制出了多类型的开关磁阻发电系统，囊括 10W~5MW 各个功率等级。从根本上来说不同的应用场合对电机的要求是一致的，主要的区别在于容量的大小不同。

现阶段，SRG 发电系统只在航天飞机的起动/发电系统中得到实际应用，在风力发电中的应用尚在研究阶段，国内的研究主要集中在几所高校，如浙江大学、哈尔滨工业大学、北京交通大学等。各高校进行了相关的仿真建模和初步的实验探究^[36-39]。对于开关磁阻发电机在风力发电中的工程应用尚未推广。

1.6 本课题的研究内容与研究重点

在风力发电中，风力带动风车扇叶转动将风能转化为机械能，使用外转子发电机在结构上更直接更可靠。本文的主要设计了外转子开关磁阻发电机及其控制系统，制定相应的控制策略。在此基础上结合现有的实验条件，对硬件部分和软件部分进行相关的测试实验，实现电机的发电运行，分析发电性能，为今后的进一步研究打下基础。

本课题研究内容主要有以下几部分：

第一章为绪论，从能源短缺和环境保护的角度阐述了发展风力发电事业的必要性。总结了现有的风力发电技术和风力发电发展现状，对比较了几类常用风力发电机的特点，确定了开关磁阻发电机应用于风力发电中的优势。确定了全文结构和研究内容。

第二章为开关磁阻发电机的基本结构与运行原理。介绍了外转子开关磁阻发电机的结构特点，阐述了 SRG 运行原理以及基本理论，分析了 SRG 自励发电和他励发电两种发电模式，总结开关磁阻发电机的优缺点。

第三章为外转子开关磁阻发电机的模型，利用 Matlab/Simulink 软件对 12/16

极外转子开关磁阻发电机进行非线性数学建模，介绍了每个模块的功能与结构，并在有限元软件中用电磁场的方法仿真验证 Matlab 所搭建模型的正确性。

第四章为开关磁阻发电机输出特性仿真研究，在所建 Matlab 非线性电机模型的基础上仿真，研究开关磁阻发电机的稳态性能和动态性能。探讨不同参数对开关磁阻发电机供电系统的影响，同时对开关磁阻发电机系统的绕组故障、缺相故障进行仿真分析。

第五章为开关磁阻发电机控制系统的硬件和软件设计研究，基于理论分析和仿真研究，设计了外转子开关磁阻电机样机控制系统的硬件和软件，包括功率电路，DSP 最小系统及其外围控制电路，开关电源等。开发了发电系统实验平台，在实验平台上进行了发电实验，研究风力发电系统的控制方法。

第六章为总结与展望，总结了全文所做的工作，对后续的研究工作提出设想和展望。

第 2 章 开关磁阻发电机的基本结构与运行原理

作为一种新类型的直流发电设备，开关磁阻发电机有结构简单、成本低廉、耐高温、容错能力强等优点，且具有良好的低速直驱性能，在低速直驱风力发电系统中有极大的应用前景。

本章分析了外转子开关磁阻发电机的基本结构、运行原理以及能量转化过程，介绍了 SRG 自励发电和他励发电两种励磁模式。总结了开关磁阻发电机的控制方法。为 SRG 电机的后续的仿真和实验研究提供理论支持。

2.1 开关磁阻发电机的基本结构与原理

2.1.1 开关磁阻发电机系统的基本结构

开关磁阻发电机发电系统主要由四个部分构成：开关磁阻发电机、功率变换器、控制器、位置传感器^[40]，系统框图如图 2-1 所示。

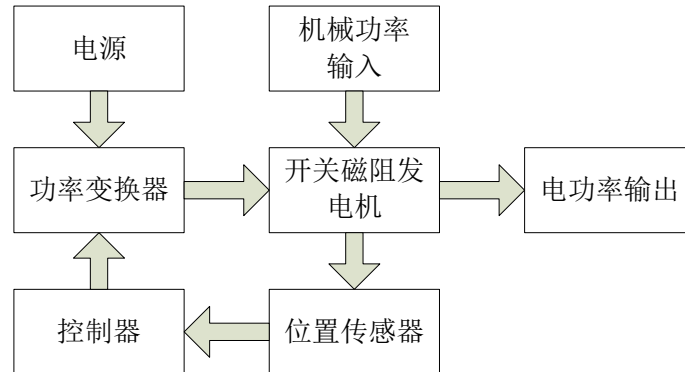


图 2-1 开关磁阻发电机系统框图

开关磁阻发电机是整个发电系统的核心，机械能和电能在其中实现能量的转换。SRG 电机为双凸极结构，定、转子铁芯由导磁材料硅钢片叠压而成。定子齿每个齿极都绕有集中绕组；转子既无励磁绕组也无永磁体，装有位置检测元件。开关磁阻发电机可改变定转子极数得到不同的电机结构，从而实现多种性能，常用的定转子极数结构有 6/4 极、8/6 极、10/8 极等，根据不同场合的需要可设计为两相、三相或四相电机结构。在风力发电中，考虑到风速较低情况下也能正常发电，定转子极数多的结构形式更可靠，有利于减小转矩脉动和电压纹波。基于

以上分析本文设计了一种外转子 12/16 极三相开关磁阻发电机，定子铁芯在内，转子铁芯在外，集中绕组绕在定子上。电机结构如图 2-2 所示。SRG 电机的结构简单，造价低廉，性能稳定，适用于恶劣环境下。

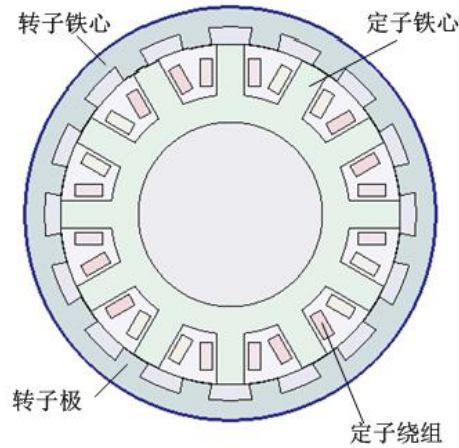


图 2-2 开关磁阻发电机结构图

功率变换器是系统中能量交换的桥梁，在电机励磁时供给电机所需的电能，在电机发电时输出产生的电能。功率变换器在整个 SRG 发电系统的成本中，占很大比重，因此合理设计功率变换器是提高系统性价比的重要手段。控制器是 SRG 发电系统的指挥中枢，根据检测信号和外部输入的控制指令，实现对 SRG 电机的运行状态的控制。控制器主要由 DSP 及外围接口电路共同组成。位置传感器的作用是给控制器传输转子位置信号，在此基础上正确的控制相绕组的开关时刻。四个部分紧密配合，组成一个完整的系统，共同实现 SRG 发电系统的功能。

2.1.2 开关磁阻发电机的基本原理

可以将电机根据转矩产生的原理不同分为两类：一类是因电磁作用产生转矩的电机，定转子磁场之间的相互作用使二者的磁场方向趋于同向，主要类型有普通的直流电机和交流电机。另一类是磁阻性质转矩的电机，定、转子相对运动时，之间的气隙磁阻发生变化，磁通分布要遵循“磁阻最小原则”，即磁通总要沿着磁阻最小的路径闭合。由此产生切向磁转矩。磁力矩总是使转子运动趋向磁阻最小的位置，即定转子齿极正对、定子极轴线和转子极轴线相重合的位置^[41]。开关磁阻发电机就属于磁阻性质转矩的电机，磁转矩对于电动机是动力转矩，而对

于发电机是制动转矩。下面介绍 12/16 极三相外转子 SRG 的运行机理。

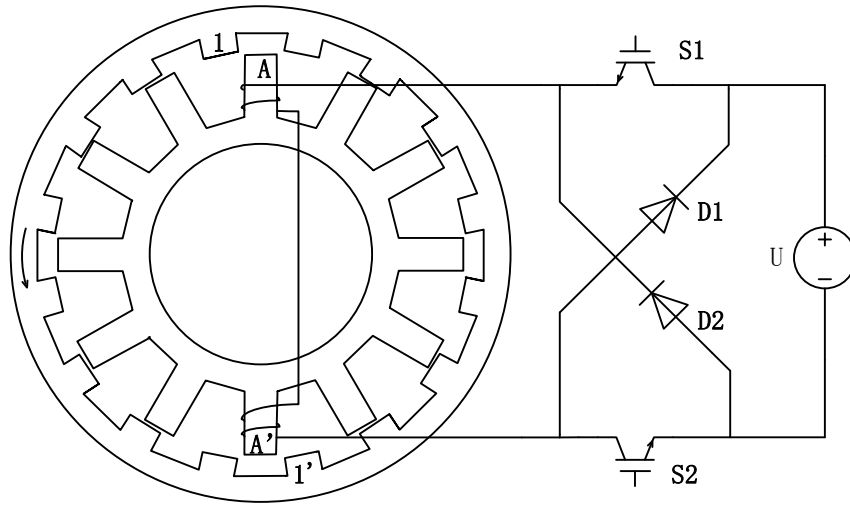


图 2-3 开关磁阻发电机工作原理示意图

SRG 三相完全对称，A、B、C 三相运行原理相同，以 A 相为例，图 2-3 中示意了定子 A 相绕组一对磁极及其外电路。假设发电机在原动机带动下，转子以逆时针方向旋转。电机运行到图 2-3 中定转子相对位置时，开关 S1、S2 导通，直流电源 U 为 A 相绕组供电，提供起励电压。磁力线经定子极 A、气隙、转子极 1、转子铁芯、转子极 1'，回到定子极 A'，最后通过定子铁芯形成闭合回路。该位置下定子极轴线与转子极轴线不重合，根据“磁阻最小原则”，产生的磁阻转矩有使转子旋转到定子极轴线 A-A' 与转子极轴线 1-1' 重合的运动趋势，即磁力矩为顺时针方向，与转子运动方向相反，为制动转矩。此时电机将外部输入的机械能以及外加励磁电源的电场能转化成磁场能储存起来，此为励磁过程。转子转过一定角度以后，开关 S1、S2 关断，A 相绕组电流方向不能突变，电流通过二极管 D1、D2 续流，电能反馈电源，对电源反向充电。此时储存的磁场能转化成电能，完成发电过程。开关磁阻发电机的发电过程实质上是以磁场为媒介的将机械能和励磁电能转化为电能输出的过程。

B、C 两相发电过程原理与 A 相相同。因此，依次按 A-B-C-A 的顺序给相绕组通电励磁，机械能转化的电能将按 A-B-C-A 的顺序输出，实现发电运行。相反的，当原动机带动开关磁阻发电机转子顺时针旋转时，只需改变各相的励磁顺序，按 C-B-A-C 的顺序通电励磁，便可按 C-B-A-C 的顺序输出电能。由此可见，开关磁阻发电机能够通过简单地改变控制策略方便地改变正反转的发电方式。另

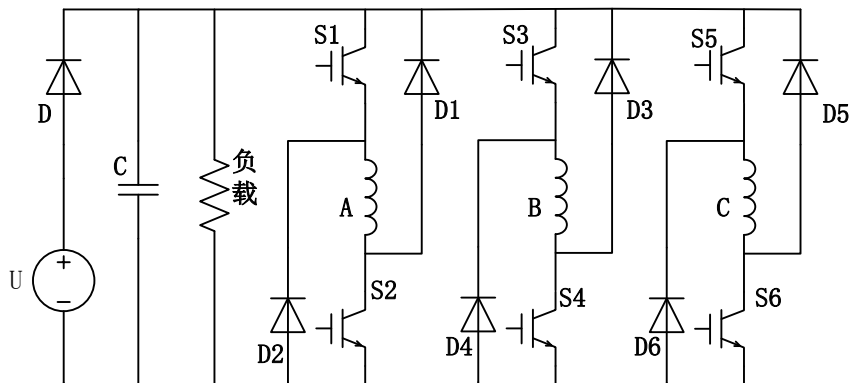
外，由于 SRG 的电磁转矩为磁阻性质，SRG 各相发电顺序与相绕组的电流方向无关，仅由各相励磁通电顺序决定。这一特点使设计上能够充分简化功率变换器电路。

本文主要研究外转子开关磁阻电机在风力发电中的发电应用，因此不介绍其电动运行原理。从根本上讲，开关磁阻电机电动状态和发电状态基本原理相同，都是利用了最小磁阻原理，不同之处在于控制策略：电动状态相绕组在电感波形上升区间导通；发电状态相绕组在电感波形下降区间导通。

2.2 开关磁阻发电机励磁模式

开关磁阻发电机控制器有多种拓扑结构可以选择，SRG 常用的结构为三相不对称半桥结构，具有极好的稳定性，可避免上下桥臂直通的故障。SRG 励磁模式主要有两种：自励模式和他励模式。两种工作模式都是建立在三相不对称半桥的基础上的。

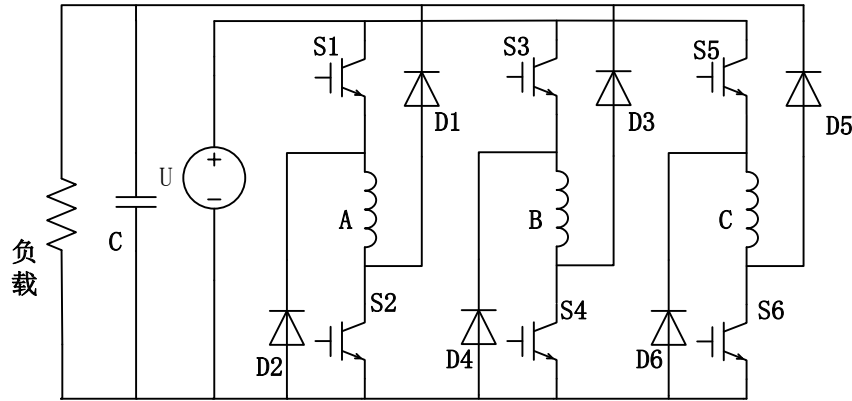
自励模式如图 2-4（a）所示，该励磁模式下外电源提供初始励磁，直流电源只在电压建立的初期起到励磁作用，当发电电压逐渐趋于稳定，幅值高于励磁电压后，电源串联的二极管反向截止自动切断直流励磁电源。然后相绕组的励磁过程由 SRG 电机自身发电电压提供励磁。自励模式下电机稳定工作时自身发电电压可提供电机的励磁电压，不再需要外电源提供持续的励磁，因此系统体积小巧，线路较简单。



（a） 自励模式主电路

在他励模式如图 2-4(b)所示，该励磁模式下励磁回路与发电回路彼此独立，直流电源持续提供励磁，续流发电电路输出的发电电压与励磁电压大小可以独立

调节，二者互不影响。系统控制较方便，线路较复杂。



(b) 他励模式主电路

图 2-4 SRG 两种工作模式下的主电路结构图

两种励磁模式各有优点，在 SRG 发电系统的设计中，应根据 SRG 运行条件选择工作模式^[42-44]。本文选择了自励发电模式。

2.3 开关磁阻发电机的解析分析

影响 SRG 发电性能最主要的因素是 SRG 相电流波形。SRG 电机控制灵活但受铁芯饱和的影响，定子绕组中的相电流波形变化与控制参数的变化为非线性关系。由于 SRG 有多变量、高度非线性的特点，对其数学模型直接分析较复杂，本节研究其简化的线性模型，对各过程的电流解析分析，为后文制定 SRG 的控制策略提供理论依据。对电机分析条件作出假设：

- (1) 三相绕组绕线方式相同且相间无耦合；
- (2) 电机磁路不饱和，电流和电感相互独立无联系；
- (3) 忽略所有的功率损耗及电力电子功率元件的压降；
- (4) 忽略控制器操作时间及元件反应时间。

2.3.1 开关磁阻发电机电感的线性分析

由于开关磁阻发电机运行时铁芯严重饱和，电感、电流随转子位置变化关系是高度非线性的，导致转矩特性难以求解，如果根据不同的转子位置将电感曲线划分成若干区域，在不同区域内用线性曲线进行近似，可使相电流的分析得到简化^[45]。

SRG 一个导电周期的电感线性曲线如图 2-5 所示，设零点表示 SRG 定子极和转子槽对齐位置。 θ_1 表示定子极前沿与转子极后沿重合位置， θ_2 表示定子极后沿与转子极前沿重合位置， θ_3 表示定子极后沿和转子极后沿重合位置， θ_4 表示定子极前沿和转子极前沿重合位置。 $\theta_1 \sim \theta_2$ 区间内定、转子极无重合部分，磁阻最大，电感最小，电感值近似为 L_{\min} 。 $\theta_3 \sim \theta_4$ 区间内定转子极始终重合，磁阻最小，电感最大，电感值近似为 L_{\max} 。 $\theta_2 \sim \theta_3$ 区间内定转子齿的重合部分随转子转动不断增大，电感近似为线性，斜率为 K ； $\theta_4 \sim \theta_5$ 区间内电感斜率近似为 $-K$ 。 θ_5 之后的过程是新的导电周期。电感 L 与转子位置 θ 的线性解析关系如式 (2-1)：

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{\min} & (\theta_1 \leq \theta < \theta_2) \\ K(\theta - \theta_2) + L_{\min} & (\theta_2 \leq \theta < \theta_3) \\ L_{\max} & (\theta_3 \leq \theta < \theta_4) \\ L_{\max} - K(\theta - \theta_4) & (\theta_4 \leq \theta < \theta_5) \end{cases} \quad (2-1)$$

式 (2-1) 中 $K = (L_{\max} - L_{\min}) / (\theta_3 - \theta_2) = (L_{\max} - L_{\min}) / \beta_s$ ，其中 β_s 为定子的极弧。

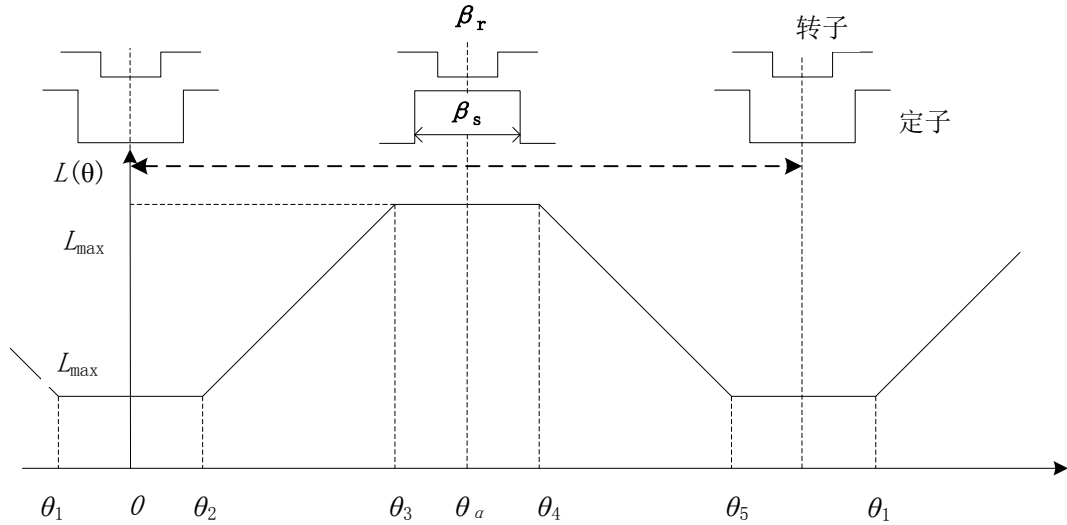


图 2-5 定、转子位置/电感关系曲线

2.3.2 相绕组电流解析

本小节以 A 相绕组为例，分析了 SRG 运行过程中不同阶段的相绕组电流情况。图 2-6 为 SRG 单相电路励磁阶段和续流发电阶段的分解示意图。

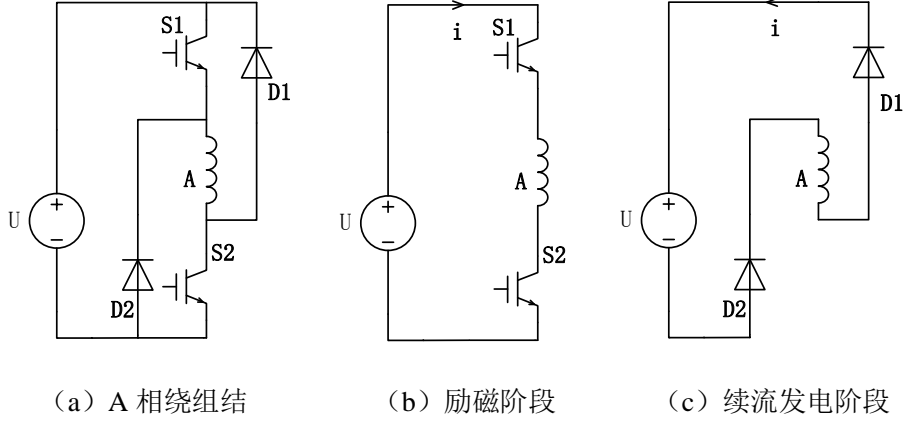


图 2-6 SRG 单相电路示意图

在开关磁阻电机中，每相电路的电压方程可表示为

$$\pm u = ir + \frac{d\psi}{dt} = ir + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} \quad (2-2)$$

外转子 SRG 相绕组的电阻很小，为了便于研究可以忽略。即忽略式 (2-2) 中 ir 项，并将等式两端同乘以 i ，得到

$$\pm ui = i \frac{d\psi}{dt} = Li \frac{di}{dt} + i^2 \frac{dL}{dt} \quad (2-3)$$

式 (2-3) 中 u 表示电机相绕组感应电动势， i 表示相绕组电流， ψ 表示相磁链。

“+”对应于开关导通、A 相绕组通电阶段；“-”对应于开关关断、相绕组续流阶段，即对应 SRG 发电运行状态的为励磁阶段和续流发电阶段两个过程。

在励磁阶段， $\theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{off}$ ，由式 (2-3) 得

$$ui = Li \frac{di}{dt} + i^2 \omega \frac{dL}{d\theta} \quad (2-4)$$

式 (2-4) 表示发电机吸收电能转换为磁场储能和吸收机械能以反馈电能。

在续流发电阶段，即 $\theta_{on} \leq \theta \leq 2\theta_{off} - \theta_{on}$ ，由式 (2-3) 得

$$ui = -Li \frac{di}{dt} - i^2 \omega \frac{dL}{d\theta} \quad (2-5)$$

式 (2-5) 表示系统释放磁场储能和吸收机械能以反馈电能。

若同时将等式 (2-2) 两端除以机械角速度 ω ，式 (2-2) 变为

$$\pm \frac{u}{\omega} = L \frac{di}{d\theta} + i \frac{dL}{d\theta} \quad (2-6)$$

其中 θ 表示转子位置角， θ_{on} 、 θ_{off} 分别表示相绕组的开通角和关断角。

由于本文为方便分析将电感 L 进行了线性化处理，因此下面分段对相电流做出分析，并解析初始条件和相应的物理量，设开通角 $\theta_{on} \leq \theta_3$ ， $\theta_4 \leq \theta_{off} \leq \theta_5$ ，

$\theta_1 \leq (2\theta_{off} - \theta_{on}) \leq \theta_2$ ，电流主要在 $\frac{dL}{d\theta} < 0$ 部分，外转子开关磁阻电机工作在发电

状态。

(1) $\theta_{on} \leq \theta \leq \theta_3$ 为开始阶段，在此阶段， $L = K(\theta - \theta_2) + L_{min}$ ， u 前取“+”。

初始条件 $\theta_0 = \theta_{on}$ ， $i_0 = i(\theta_{on}) = 0$ ，按此条件求解微分方程 (2-6)，得

$$i(\theta) = \frac{u(\theta - \theta_{on})}{\omega[K(\theta - \theta_2) + L_{min}]} \quad (2-7)$$

由式 (2-7) 可见，相绕组导通的瞬间，分母值为 ωL_{min} 。开始阶段分母值较小，电流上升较快，此时电源供给 SRG 的电能主要转换为机械能输出；之后分母值变大，电流上升的速度变缓慢，电能转化为两部分，一部分以机械能输出，另一部分以磁场能存储。

(2) $\theta_3 \leq \theta \leq \theta_4$ 为线性上升阶段，在此阶段， $L = L_{max}$ ， u 前取“+”。初始条件 $\theta_0 = \theta_5$ ， $i = i(\theta_5) = u(2\theta_{off} - \theta_{on} - \theta_5) / \omega L_{min}$ ，按此条件求解微分方程 (2-6)，得

$$i(\theta) = \frac{u(\theta - \theta_{on})}{\omega L_{max}} \quad (2-8)$$

由式 (2-8) 可见，这一阶段内相绕组继续通电，相电流上升变快，以正比例上升。励磁电源输入的电能转化为磁场能储存起来。

(3) $\theta_4 \leq \theta \leq \theta_{off}$ 为持续上升阶段，在此阶段， $L = L_{max} - K(\theta - \theta_4)$ ， u 前取“+”。初始条件 $\theta_0 = \theta_4$ ， $i = i(\theta_4) = u(\theta_3 - \theta_{on}) / (\omega L_{max})$ ，按此条件求解微分方程 (2-6)，得

$$i(\theta) = \frac{u(\theta - \theta_{\text{on}})}{\omega[L_{\text{max}} - K(\theta - \theta_4)]} \quad (2-9)$$

由式（2-9）可见，这一阶段内相电流值较上阶段以更快的上升率上升。所有的励磁电能和外加机械能都转换为磁场能储存起来。因此，这是电流增加最有效的励磁区间。适当增加该区间的长度，有利于储存磁场能，在续流发电阶段转换成电能输出。但过分地延长该区间，可能延长至电动区间，减少发电能力，降低系统效率。

（4） $\theta_{\text{off}} \leq \theta \leq \theta_1$ 为续流发电阶段，在此阶段， $L = L_{\text{max}} - K(\theta - \theta_4)$ ， u 前取“-”。初始条件 $\theta_0 = \theta_{\text{off}}$ ， $i = i(\theta_{\text{off}}) = u(\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}}) / [L_{\text{max}} - K(\theta_{\text{off}} - \theta_4)]$ ，按此条件求解微分方程（2-6），得

$$i(\theta) = \frac{u(2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta)}{\omega[L_{\text{max}} - K(\theta - \theta_4)]} \quad (2-10)$$

由于励磁电压与相绕组感应电动势方向一致，即为顺向串联，因此虽然开关管关断但相电流继续上升较大幅度。这一阶段是 SRG 将机械能转化为电能的主要阶段，发出的电能多少与磁场储能的多少有关。

（5） $\theta_5 \leq \theta \leq \theta_1$ 为线性下降阶段，在此阶段， $L = L_{\text{min}}$ ， u 前取“-”。初始条件 $\theta_0 = \theta_5$ ， $i = i(\theta_5) = u(2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta_5) / \omega L_{\text{min}}$ 按此条件求解微分方程（2-6），得

$$i(\theta) = \frac{u(2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta)}{\omega L_{\text{min}}} \quad (2-11)$$

电流以较大的速率下降，机械能和磁场储能转化成电能。

（6） $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ 为持续下降阶段，在此阶段， $L = K(\theta - \theta_4) + L_{\text{min}}$ 。 u 前取“-”。初始条件 $\theta_0 = \theta_4$ ， $i = i(\theta_4) = u(2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta_5) / \omega[K(\theta - \theta_4) + L_{\text{min}}]$ ，按此条件求解微分方程（2-6），得

$$i(\theta) = \frac{u(2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta)}{\omega L_{\text{min}}} \quad (2-12)$$

相电流持续下降，直到 $\theta = 2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}}$ 时衰减为零，全部的机械能和磁场储能

都转化成电能。

由本节分析可知，（1）、（2）、（3）为 SRG 运行的励磁阶段， θ_{on} 、 θ_{off} 、 U_s 三个参数可以控制励磁过程，其中改变 θ_{off} 对系统的影响更明显；（4）、（5）、（6）为 SRG 运行的续流发电阶段，输出的电能无法直接控制，只能通过改变励磁区间控制发电过程。励磁阶段消耗电能，将电能和机械能储存为磁场储能，开关管关断瞬间的相电流值作为磁场强弱的标志，值越大越有利于发电^[46]。因此，如果需要 SRG 发电系统发出较多电能，需要增加励磁区间。发电机系统每相每周期输出的电能为发电阶段发出的电能与励磁阶段消耗的电能之差：

$$\Delta W = \int_{\theta_{off}}^{2\theta_{off}-\theta_{on}} u idt - \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} u idt \quad (2-13)$$

2.4 开关磁阻发电机系统的控制方式

开关磁阻发电机的可控参数较多，电机的控制就是通过对电机的可控参数进行调节达到控制电机运行方式的目的。常用的控制策略有四种：角度位置控制方式、电流斩波控制方式、脉宽调制控制方式、直接励磁电压幅值控制方式^[47-48]。下文对具体控制策略加以分析和讨论。

1. 角度位置控制方式（Angle Position Control, APC）

调节主开关的开通角和关断角，能改变相电流的峰值、电流续流时间及电流波形相对于电感波形的位置，进而实现控制 SRG 的电能输出。在励磁电压、转子转速等参数不变的条件下，固定开通角 θ_{on} ，适当增大关断角 θ_{off} ，即增加励磁时间，可以使相电流峰值增大，使续流时间变长，导致发电机的输出电能增加。当固定关断角 θ_{off} 时，适当减小开通角 θ_{on} ，同样可以提高发电机的输出功率。

开关磁阻电机运行在发电模式下，相电流波形主要部分在电感下降区间，因此励磁电流对 θ_{off} 的变化更敏感。因此在不同转速下的工作模式下实际采用的 APC 调节方法，一般都是先调节 θ_{off} ，然后选择合适的 θ_{on} 。因为主开关在励磁期间内始终导通，角度控制也称单脉冲控制。APC 控制方式容易实现，但相电流变化率较大，受开通角和关断角的变化影响大，电流可控性低。因此，角度位置控制方式适用于高转速工作场合以及需短时间内提高电流的场合。角度的控制容易实现，采用数字控制器可以灵活的改变控制精度。

2. 电流斩波方式（Current Chopping Control, CCC）

电流斩波控制方式是目前在开关磁阻发电机控制最常用的控制方法，控制简单，主开关的开关损耗小，也可以避免直接调整关断角导致的电流变化过敏的问题。

电流斩波控制一般通过两种方式实现：一种是固定电流斩波上、下限。在相电流高于斩波上限时，主开关关断；在相电流下降至低于斩波下限时，主开关导通。这种控制方式下的相电流波形平稳、脉动较小。另一种是固定电流斩波限及延迟时间。当转子位置角 θ 处于励磁区间内，即 θ_{on} 与 θ_{off} 之间时，若被控制相电流值低于电流斩波限值，比较器信号使控制器主开关开通，相电流上升并逐渐达到斩波限。若被控制相电流值高于电流斩波限值，则主开关关断并延时一定时间后再开通。电流沿二极管续流，同时幅值下降。这种控制方式使相电流维持在斩波限附近，并伴有较小的波动。实际应用中一般采用第二种控制方式，因为延迟时间人为设定，有利于提高数字控制器的可控制性。

调节斩波限相当于调节主开关的开通、关断时刻，从而控制励磁电流在一定区间内波动。因此，CCC 控制方法与 APC 控制方式在本质上一样，不同之处在于 CCC 方式是直接控制电流，通过调节滞环宽度可以较精准地控制电流波动范围，而在 APC 方式下电流不可控。

3. 脉宽调制控制方式（Pulse Width Modulation, PWM）

脉宽调制控制方式是在固定励磁区间的前提下，以占空比不同的 PWM 信号调制主开关器件控制信号。

PWM 控制方式中有两个可控参数：斩波频率和占空比。选择适当的斩波频率后将其设为固定值，斩波频率决定相电流频率；占空比与相电流峰值之间有线性关系，占空比 D 越大，励磁区间越长，相电流越大。通过改变占空比可以改变相电流的波形。该控制方式下相电流的频率和幅值都是可控的，若配合闭环系统有利于获得更优质的动态性能。PWM 控制方式的缺点是开关频率较高，开关损耗大，使系统效率有所下降。

4. 直接励磁电压幅值控制方式

开关磁阻发电机外电路可以采用自励发电模式或者他励发电模式。若采用他励模式，可以在确定了开通角和关断角的基础上，直接调节励磁电源的电压幅值，提高系统发电性能。提高励磁电压，可以使励磁电流升高，增大发电输出功率。

2.5 本章小结

本章先介绍了 SRG 发电系统的基本结构,系统由双凸极 SRG、功率变换器、控制器以及位置传感器共同构成的,这四部分紧密联合使系统成为一个高性能的机电一体化的整体。

然后分析了 SRG 的工作原理,对电机的相电流进行了详细的解析分析,得到控制绕组电流通断可以控制 SRG 运行状态的结论。

开关磁阻发电机的励磁方式有两种:自励模式和他励模式。自励模式结构体积小成本低,他励模式控制方便运行可靠,二者各有优点,根据实际需要选择励磁方式。

SRG 可控参数多,控制方式也有多样:如角度位置控制、电流斩波控制、PWM 控制等,在不同的工作条件下可以选择不同的控制方式。

第 3 章 外转子开关磁阻发电机的模型建立

3.1 引言

本文设计了一种适用于风力发电的 12/16 极外转子开关磁阻发电机。为了探究不同参数对电机发电性能的影响，需要建立一种直观的、可靠的、简便易行的模型进行仿真和分析。本章在样机基础上，建立了 Matlab/Simulink 中的非线性数学模型。

建立基于 Matlab/Simulink 的外转子开关磁阻发电机的模型有重要的意义和作用：（1）对于发电机本体及其驱动控制的设计，尽管开关磁阻电动机方面的模型已经得到很好的研究，但开关磁阻发电机特别是外转子开关磁阻发电机等方面的模型研究较少；（2）对电机的仿真可以采用磁路方法建立模型，但是存在精度低的问题；也可以采用电磁场有限元方法建立模型，但是由于耗时，电磁场的有限元方法只适用于最后方案的确定和矫正。

本章主要研究内容是建立 Matlab/Simulink 环境中的外转子开关磁阻发电机非线性模型，并在基准模型参数下仿真得到 SRG 稳定发电电压波形。然后，采用电磁场有限元方法利用软件 Ansoft/Maxwell 2D 建模仿真，验证 Matlab 所建模型的正确性。

3.2 开关磁阻发电机基于 Matlab/Simulink 中的模型建立

Matlab 中的 Simulink 是一个具有高级运算能力的数学分析软件，建模简洁、准确，而且 Matlab 的工具箱有丰富的器件资源有助于实现多种控制策略，因此 Matlab/Simulink 是建立仿真模型的理想环境。以电感曲线为基础可以对开关磁阻发电机进行建模和分析。开关磁阻发电机运行时铁芯磁通密度高度饱和，相电流波形非正弦。因此若在分段线性化电感的基础上建立 SRG 模型，虽建模方便、计算快捷，但仅能得到开关磁阻电机发电情况的近似结果。本文利用有限元方法得到磁化曲线簇，并在此基础上建立开关磁阻发电机模型，比线性 SRG 模型更加精准。在 Matlab/Simulink 环境下建立的外转子开关磁阻发电系统的模型由 SRG 模型和其他各个功能模块共同构成，发电系统的各参数在对应的模块里便于修改。

该模型直观性强，且具有较好的仿真精度，有较高的研究和应用价值^[49-51]。

本节对三相 12/16 结构 SRG 建立仿真模型，外电路采用不对称半桥结构。仿真系统采用了电流滞环斩波控制和电压开环控制方案。励磁方式采用自励模式，在直流电源回路串联了单向二极管。SRG 开始运行时，直流电源给相绕组通电，当电机发电并且输出电压大于励磁直流电压时，二极管反向截止，自动将励磁电源切断。如果供电系统受扰动输出电压跌落，输出电压低于励磁电源的电压值时，励磁电源经过二极管自动对电机施加励磁，有利于消除干扰后的 SRG 快速恢复正常运行。

图 3-1 为开关磁阻发电机发电系统整体控制图，其中包括各个功能的封装模块，主要有开关磁阻发电机模型、SRG 的功率变换器模块、转子角度位置输出模块、电流斩波控制模块和励磁区间控制模块。

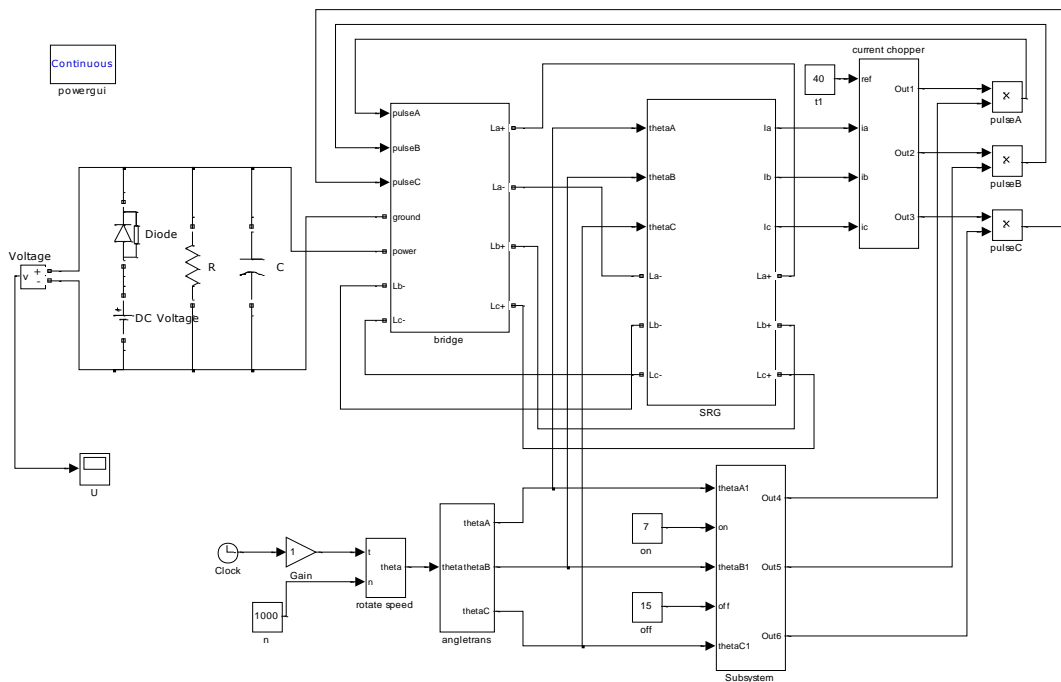


图 3-1 开关磁阻发电机发电系统整体控制图

3.2.1 功率变换器模块

图 3-2 是开关磁阻发电机模型中的功率变换器，其主电路结构采用三相不对称半桥结构。以 A 相桥臂为例，La+ 和 La- 分别接在 A 相绕组的两端，pulseA 是主开关管 IGBT 和 IGBT1 的逻辑控制信号，Diode 和 Diode1 为续流二极管。当两个开关管同时导通时，A 相通电，是励磁过程；开关管关断以后，A 相电流将

由两个二极管续流，对电源反向充电，是续流过程。在续流发电阶段，磁场储存的磁场能转换为电能反馈电源或者流向其他导通相。

电机三相完全对称，B 相、C 相结构和原理相同。该模块在三相不对称半桥主电路的基础上，根据输入模块的控制信号控制开关管的导通和关断，从而控制电机运行在励磁区间或者续流发电区间。

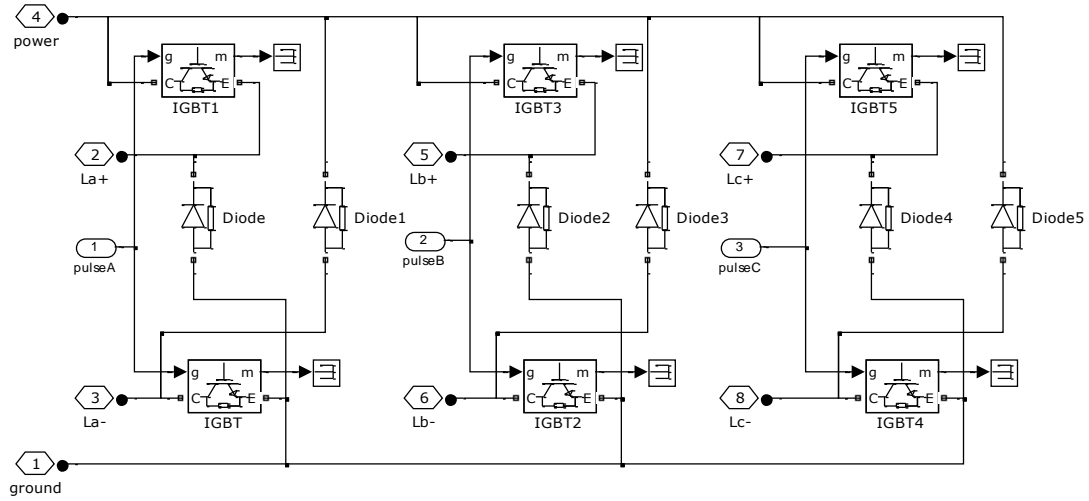
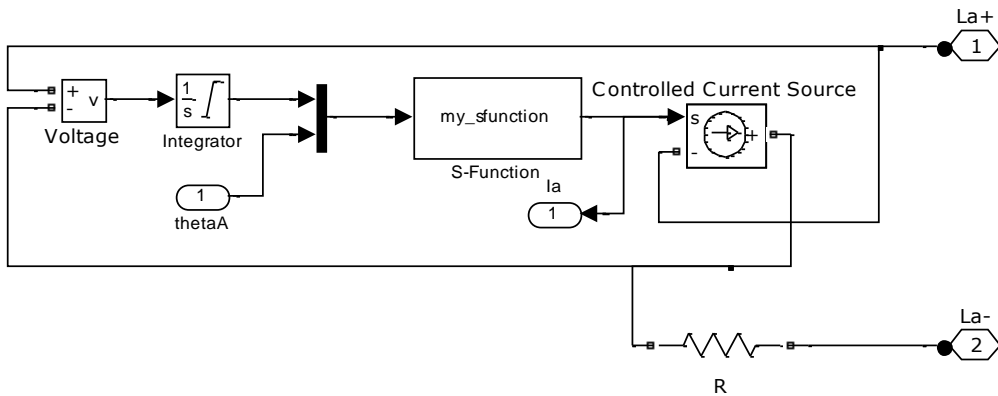


图 3-2 功率变换器模块结构图

3.2.2 开关磁阻发电机模型

开关磁阻发电机模型是系统模型的核心部分。具体模型如图 3-3 所示，该模

型由公式 $\pm u = ir + \frac{d\psi}{dt}$ 结合 SRG 非线性磁化曲线簇得到。



3-3 开关磁阻发电机模型结构图

建立该 SRG 模型的关键是得到相绕组中的瞬时电流值。电机三相完全对称，以 A 相为例，图 3-3 等效于开关磁阻发电机 A 相绕组非线性数学模型。其中，

thetaA 输入电机 A 相绕组位置信号，R 为 A 相绕组电阻，La+、La-两个端子分别接在上下桥臂的两个开关管上。电压表可测得受控源两端的电压值，即 $\pm u - i_a R$ ，经过积分环节可得磁链值。根据已有的电机参数可以利用有限元仿真出电机的磁特性关系——关于角度和电流的磁链函数，实时的对数据进行插值可以反演出电流关于角度和磁链的特性函数 $i_a(\theta, \Psi)$ ，其三维图形如图 3-4 所示。在函数 S-function 下，输入行向量角度值和列向量磁链值，可以输出电流向量。此模型简化了建模过程，不需求取磁链对电流和磁链的偏导值。

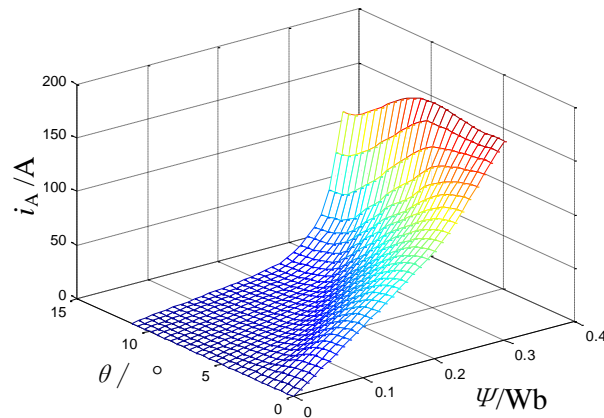


图 3-4 电流函数三维图形波形图

3.2.3 转子角度位置输出模块

如图 3-5 所示为转子角度位置输出模块。本文外转子开关磁阻发电机结构为 12/16 结构，相电感周期为 22.5° ；定子 A、B、C 三相依次相差 7.5° 机械角度导通。位置传感器测得的转子位置信号以一周期 22.5° 变化，利用 22.5° 求余模块搭建模型，从而确定仿真过程中的相绕组的具体导通位置和关断位置。

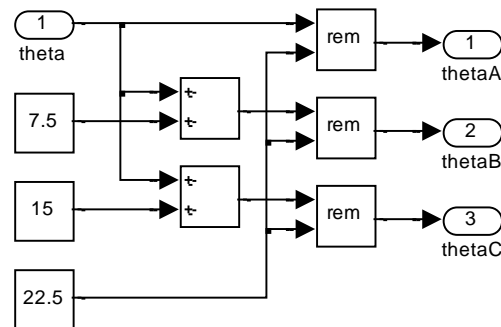


图 3-5 转子角度位置输出模块结构图

3.2.4 电流斩波控制模块

电流斩波模块如图 3-6 所示，在 Relay 环节中设置电流滞环宽度，将取得的每相绕组电流值与斩波限比较，若实际值在电流滞环宽度内，输出 1；若超出滞环宽度，输出 0。由于主开关的开通、关断角度设置为确定的值，因此电流斩波模块与开关角度模块共同作用，可控制主开关的通断，使电流值保持在限值之内。

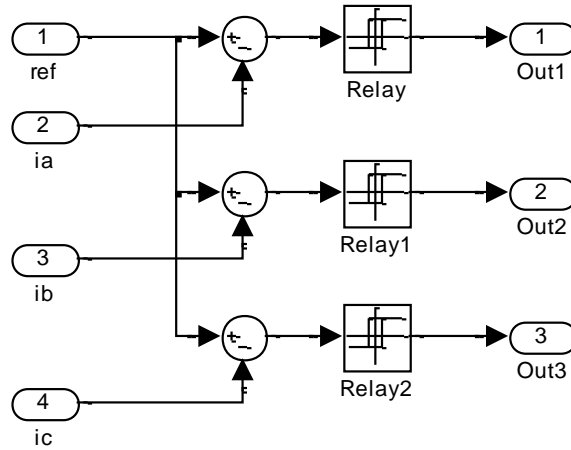


图 3-6 电流斩波控制模块结构图

3.2.5 励磁区间控制模块

图 3-7 为励磁区间控制模块， θ_{A1} 、 θ_{B1} 、 θ_{C1} 三个输入端口分别是转子三相位置的信号，on、off 两输入端口为相绕组励磁的开通角信号和关断角信号。

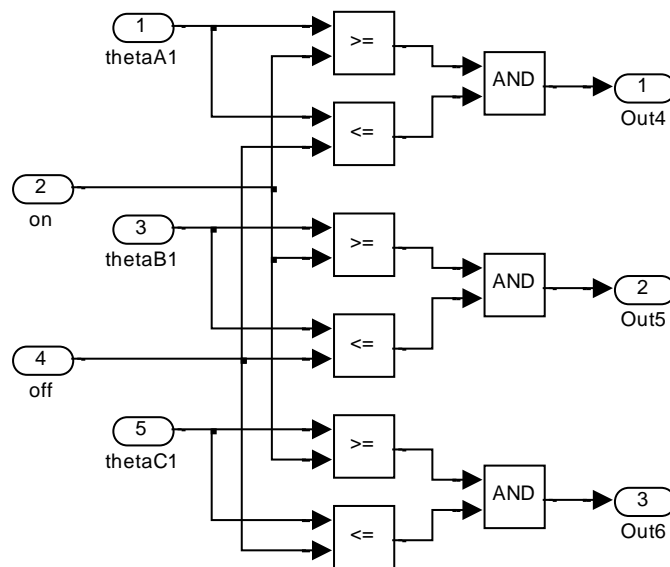


图 3-7 励磁区间控制模块结构图

将转子角度值与相绕组励磁区间的开通关断角度值作比较，若转子位置信号值在励磁区间内，输出值为 1，即当前相通电处于励磁区间；反之输出值为 0，当前相处于续流发电区间。

3.2.6 Matlab/Simulink 建模仿真波形

由于开关磁阻发电机发出直流电能，因此不需要研究发电时的功角稳定问题，只需探究其电压稳定性。

设置基准模型参数为：起励电压为 45V，导通角为 7°，关断角为 14.5°，转速为 1000r/min，稳压电容为 1000 μ F。利用图 3-3 所示的开关磁阻发电机供电系统仿真模型进行仿真。仿真所得电压波形如图 3-8，约 0.145s 时稳定建压，稳定电压平均值为 306.5V。

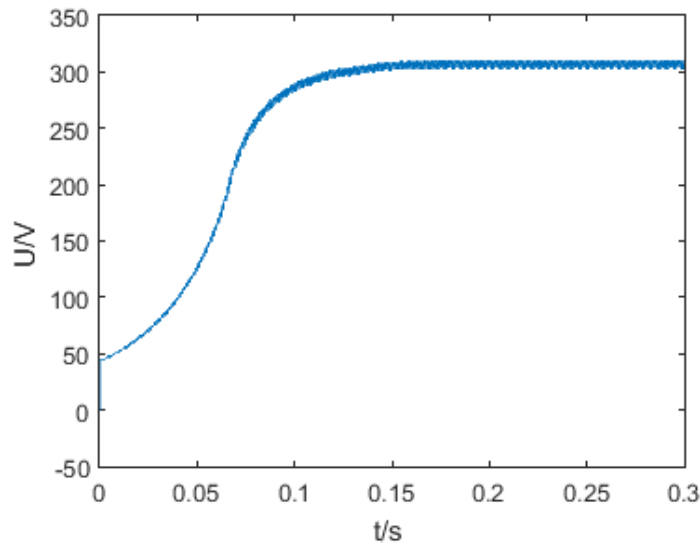


图 3-8 Matlab/Simulink SRG 建模电压波形图

将得到的电压仿真波形与后文的有限元方法中场的计算结果作对比，以判断 Matlab/Simulink 建模的合理性和准确性。

3.3 开关磁阻发电机基于 Matlab/Simulink 模型的有限元法验证

本文对 Matlab/Simulink 搭建的模型以电磁场有限元的仿真方式加以验证。开关磁阻发电机的磁场计算将计及铁芯的非线性磁特性，以及边缘散磁和漏磁场，通过 Ansoft/Maxwell 2D 有限元软件对 12/16 外转子开关磁阻发电机进行仿真计算。

3.3.1 开关磁阻发电机模型的建立

根据电机尺寸、材料等参数在 Ansoft/Maxwell 2D 中建立结构图，并搭建外电路，建模样机参数如表 3-1 所示。

表 3-1 建模样机参数

电机参数名	数据	电机参数名	数据
额定直流电压(V)	48	定子外径 (mm)	223.2
额定转速 (r/min)	1000	定子内径 (mm)	121
定子极数	12	线圈匝数	32
转子极数	16	并联支路数	1
定转子材料	D23-50	转子轭厚 (mm)	13
铁芯长度 (mm)	60	转子极弧系数	0.44
定子轭厚 (mm)	15	转子外径 (mm)	270
定子极弧系数	0.32	转子内径 (mm)	224

电机结构图及相绕组分布图如图 3-9 和图 3-10 所示，展示了电机的直观结构和三相励磁绕组的安排。

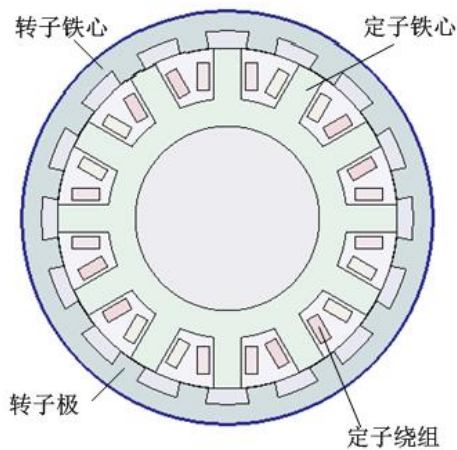


图 3-9 SRG 电机结构图

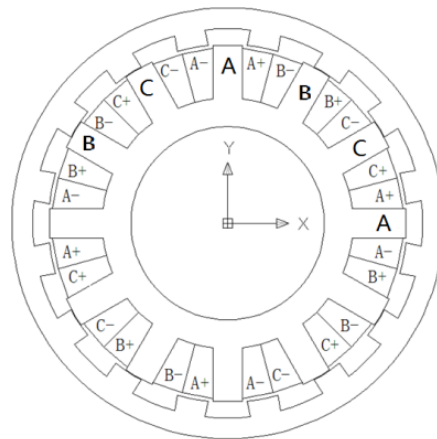
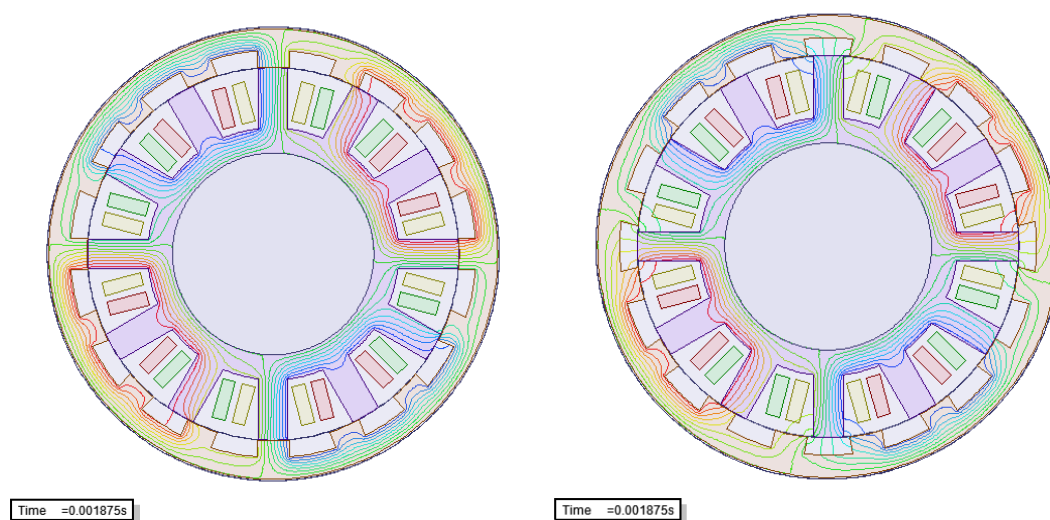


图 3-10 电机各相绕组分布图

图 3-11 为电机磁场分布图，分别为定子齿对齐转子槽位置的磁场分布情况和定子齿对齐转子齿位置的磁场分布情况。在磁场分布图中，磁力线依次经过定子铁芯、定子齿、气隙、转子齿、转子铁芯、转子齿、气隙，回到定子齿组成闭合回路，可以看出电机的磁场分布比较合理。



(a) 定子齿对齐转子槽位置

(b) 定子齿对齐转子齿位置

图 3-11 不同位置下磁场分布图

3.3.2 开关磁阻发电机外电路的搭建

SRG 以自励方式励磁，外电路包括控制电路和功率电路，如图 3-12。由控制电路发出控制信号，决定三相开关管的导通和关断。功率电路与定子三相绕组相连，开关导通时，励磁电源给定子相绕组供电；开关关断时，相绕组中的电流通过二极管续流。将外电路导入 Ansoft/Maxwell 2D 中可以计算出系统的性能参数。外电路中各参数经计算后，设置如表 3-2 所示。

表 3-2 外电路中参数

电机参数名	数据
相绕组电阻 (Ω)	0.103
端部漏电感 (H)	8.033e-005
电源电压 (V)	45
负载 (Ω)	100
开通角 ($^\circ$)	7
关断角 ($^\circ$)	14.5

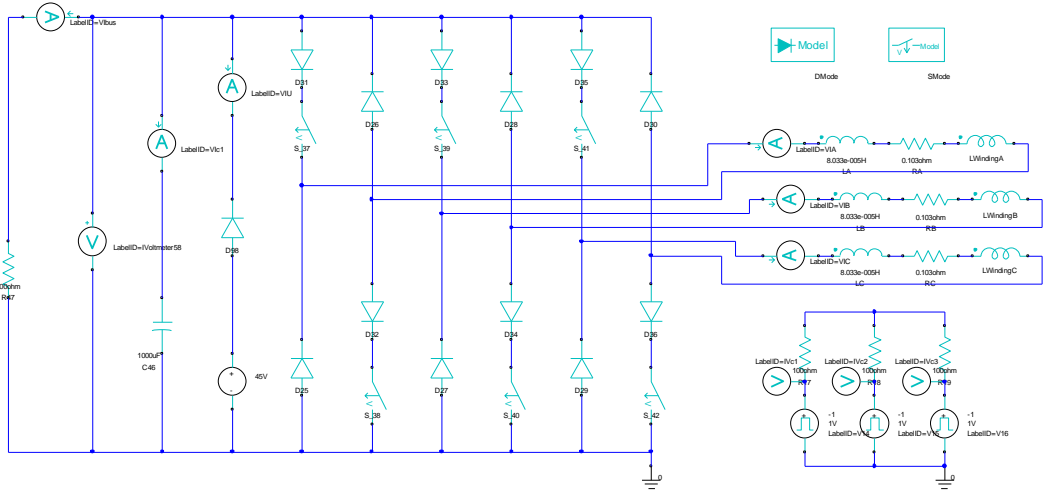


图 3-12 SRG 外电路图

外转子 SRG 电压波形如图 3-13，约 0.155s 时稳定建压，稳定电压平均值为 292.1V。

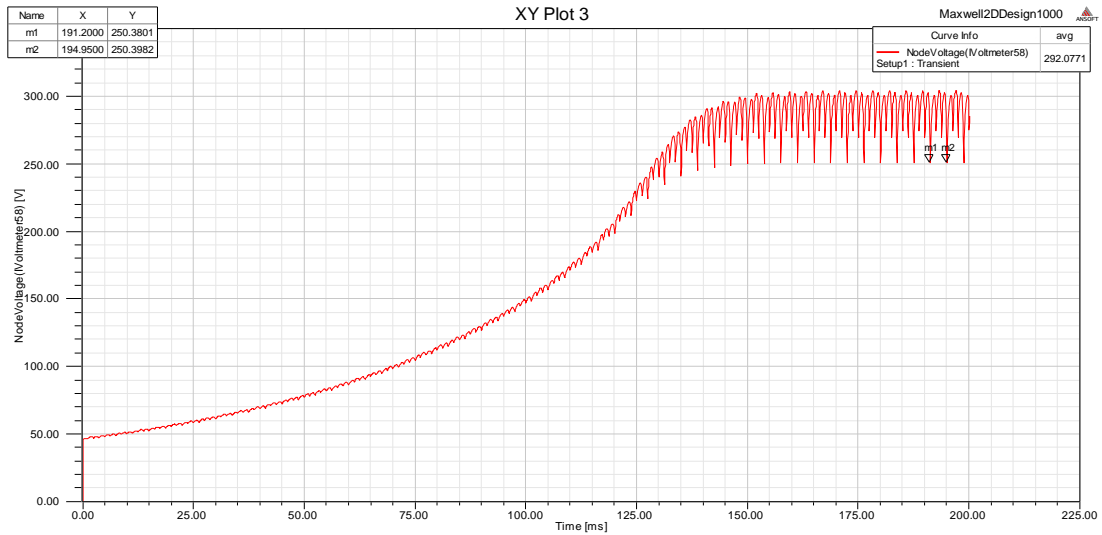


图 3-13 Ansoft 外转子 SRG 电压波形图

将 Matlab 数学模型与此模型作对比，Matlab 数学模型稳定建压时电压平均值比有限元模型电压平均值约高 3%。两种模型算法不同，Matlab/Simulink 模型是在非线性电机模型的基础上根据数学关系建模；Ansoft/Maxwell 2D 模型是对电机整体有限元剖分进而进行场的计算。算法不同导致了两种建模仿真结果有所差异，但是误差值很小，由此可以验证在 Matlab/Simulink 环境下建立的外转子 SRG 模型是正确的，可以用于快速仿真不同条件下的电机性能。

3.4 本章小结

本章对外转子 SRG 发电系统进行了建模，主要在 Matlab/Simulink 环境下建立了非线性数学模型，并在有限元环境下对电机进行仿真以验证 Matlab/Simulink 中模型的正确性。

Matlab 软件建模直观、准确、修改参数可操作性高，在磁化曲线的基础上对电机进行建模，改进了非线性模型不够精准的缺点。SRG 发电系统数学仿真模型的建立为快速、直观地分析开关磁阻发电机系统发电性能和电机故障动态性能提供了有效的手段。

尽管有限元软件在电机设计中因其计算精度高的优点被广泛应用，但是由于 SRG 电机可控参数多，初步设计时更简化的模型有利于提高工作效率。因此本文选择使用 Matlab 环境下搭建电机模型，进行下一步的仿真实验。

第 4 章 开关磁阻发电机输出特性仿真研究

本章基于 Matlab/Simulink 环境下的模型对外转子开关磁阻发电机发电系统进行了综合仿真。改变各个控制参数，仿真 SRG 发电系统的电压性能，分析各参数对系统发电性能的影响，从而选择较好的控制方法。本章不仅进行了稳态性能的仿真实验，也研究了突然断相的情况下的系统发电可靠性。由于开关磁阻发电机发出的是直流电，不必考虑电机发电电压功角稳定问题，在本章的仿真实验中将只研究其电压稳定性。

基于图 3-1 的 SRG 仿真模型对电机发电的不同工作状态进行了仿真实验，探讨了各个控制参数对外转子开关磁阻发电机发电的影响，主要有励磁电压、相绕组的开通关断角、电机转速、稳压电容等参数。

设置 SRG 基准模型的参数为：起励电压为 45V，导通角为 7° ，关断角为 14.5° ，转速为 1000r/min，稳压电容为 $1000\mu\text{F}$ 。探究某一参数对 SRG 发电的影响时，保持其它参数不变，改变单一参数。

4.1 起励电压对输出电压影响

外转子开关磁阻发电机励磁模式采用自励模式。SRG 稳定发电时建立的电压值由电机结构决定，与起励电压大小无关。但建立稳定电压的暂态过程受起励电压影响比较大。本节分别研究了起励电压为 20V、45V 和 10V 时对外电路输出电压的不同影响。图 4-1 红色波形和蓝色波形分别是起励电压为 20V、45V 时的输出电压波形，在两种起励电压下电机稳定发电电压平均幅值都是 306.5V。仿真结果表明，适度增大起励电压，可缩短 SRG 的建压过程，使发电电压迅速达到稳定值。图 4-2 是起励电压为 10V 时的输出电压波形，电压值没有上升过程，即发电机没有发电。由这个仿真可以看出，起励电压幅值过小，会导致电机励磁不足不能正常发出电能的情况。此外，开关磁阻发电机稳定工作前的暂态过程会出现很大的冲击电流，在外转子 SRG 发电系统的设计中要增加电流保护环节。

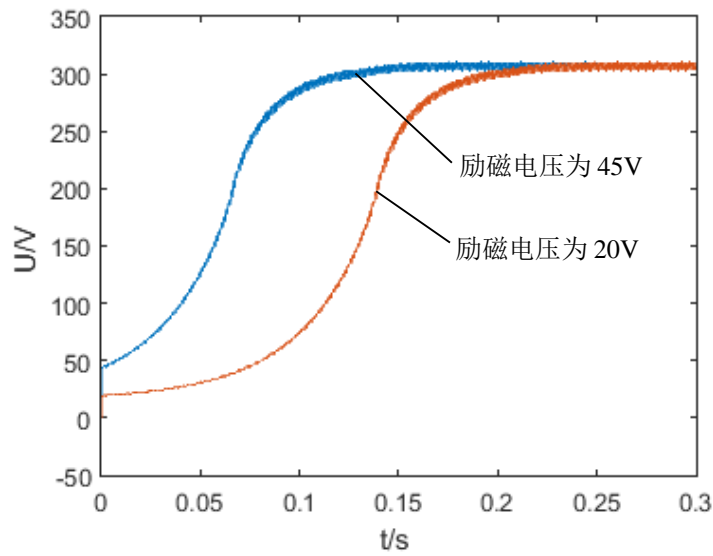


图 4-1 不同励磁电压下的输出电压波形图

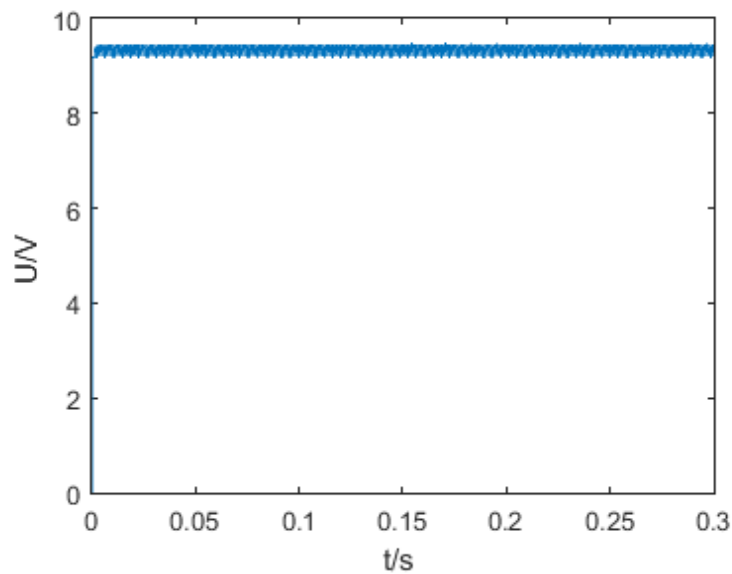


图 4-2 励磁电压为 10V 时的输出电压波形图

4.2 开通角和关断角对输出电压的影响

本节在其它参数不变的条件下，仿真了开通角和关断角分别为(1)7°、14.5°；(2)7°、15°；(3)6.5°、14.5°时三种情况对开关磁阻发电机输出电压的影响，仿真结果如图 4-3 所示。开通角和关断角为 7°、14.5°时，电压经过 0.17s 稳定发电，平均幅值 306.5V；开通角和关断角为 7°、15°时，电压经过 0.125s 稳定发电，平均幅值 322V；开通角和关断角为 6.5°、14.5°时，电压经过 0.145s 稳定发电，

平均幅值 296V。由励磁区间为 $7^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 和 $7^{\circ}\sim 14.5^{\circ}$ 两个仿真结果对比可以看出，在导通角相同的情况下，增大关断角相当于增加励磁区间，从而使输出电压的调节时间和超调量均有明显改善。励磁区间为 $6.5^{\circ}\sim 14.5^{\circ}$ 时，虽区间宽度较 $7^{\circ}\sim 14.5^{\circ}$ 区间增加，但是稳定发电电压反而变低，这是由于开通角过度提前使相绕组导通区间前段进入电动状态。两个励磁区间宽度为 8° 的仿真稳定建压过程都比励磁区间宽度为 7.5° 的仿真过程短。单独减小开通角与单独增大关断角是同样的原理，即延长励磁区间有助于增加磁场能的储存过程，进而缩短 SRG 稳定建压的过程。

SRG 在发电状态下，相绕组电流波形主要部分在电感波形下降范围内，而关断角 θ_{off} 位于这段区间，因此 θ_{off} 对 SRG 发电过程影响更大。另外，如果开通角取得过小，开关磁阻发电机可能会有部分励磁区间进入电动工作状态，会降低输出功率。开通角和关断角要经过实际试验中的调试和修改最终确定。

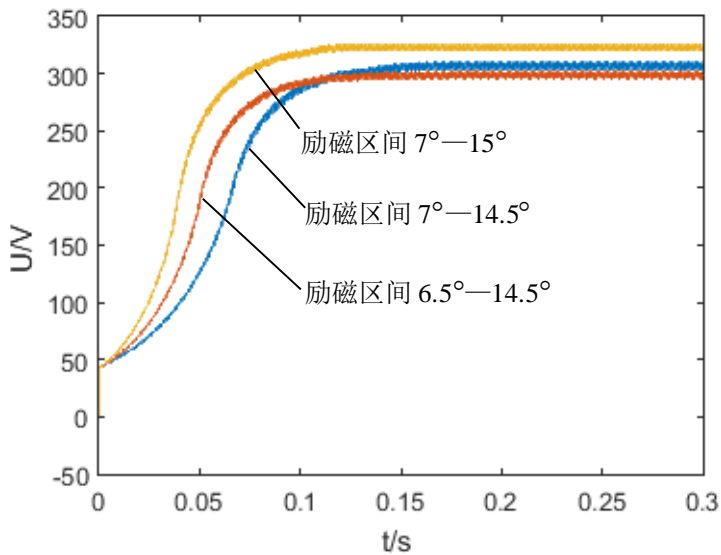


图 4-3 不同开通角和关断角下的输出电压波形图

4.3 电机转速对输出电压的影响

本节探究了电机转速对开关磁阻发电机发电电压的影响，仿真了转速为 500r/min 和 1000r/min 两种情况，仿真结果图如图 4-4 所示。转速为 1000r/min 时，SRG 经过 0.17s 稳定发电，电压平均幅值为 306.5V，幅值波动范围 6V；转速为 500r/min 时，SRG 经过 0.11s 稳定发电，电压平均幅值 182V，幅值波动范围 16V。由仿真结果可以看出，SRG 在低转速下，稳定发电电压幅值较小波动

较大；在高转速下电压幅值提高，电压纹波有所改善。这是由于 SRG 在低转速运行状态下，相电流频率较低，导致输出电压波形波动大。

适当提高电机转速有助于改善发电质量，但转速过高也可能导致发电机没有充分励磁就进入续流发电阶段，反而使输出功率降低，使电机稳定发电的过程变长。实际运行中转速的选择要综合考虑。

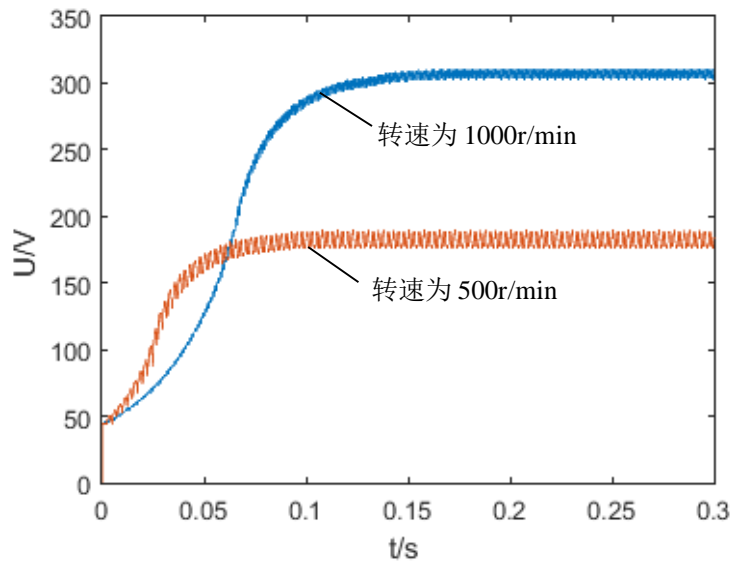


图 4-4 不同转速下的输出电压波形图

4.4 稳压电容对输出电压的影响

外接稳压电容在系统中的作用是保持 SRG 发电电压的平稳，降低纹波。本节研究了稳压电容分别为 $500\mu\text{F}$ 、 $1000\mu\text{F}$ 和 $1500\mu\text{F}$ 时对电压输出的影响，输出电压波形如图 4-5 所示。

由对比图可以看到，电容容量由小到大，电压达到稳定值的时间依次为 0.09s、0.17s、0.26s；不同稳压电容下电机的稳定发电电压平均值相同，但是电容值越大电压纹波越小。

进行稳压电容容量的选择中，并不是容量越大越好。虽然电容值大发电电压输出平稳，但相应的输出电压达到稳定所需时间变长，因此实际应用中稳压电容容量的选择应根据稳定建压的平稳性和快速性综合考虑。

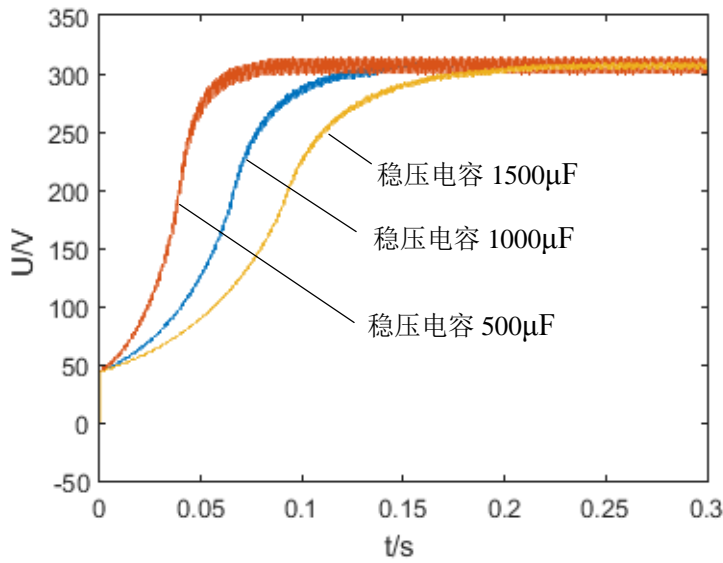


图 4-5 不同容量稳压电容下输出电压波形图

4.5 开关磁阻发电机系统缺相故障仿真分析

开关磁阻发电机在运行中比较常出现的故障有绕组开路、开关管开路故障或者由短路引起的电流过大毁坏相绕组等,这些故障使电机某相或某几相失去发电能力,使电机运行在缺相情况下。缺相故障是 **SRG** 比较容易发生的故障,因此研究开关磁阻发电机在缺相条件下的动态性能,具有重要的意义。

本节对开关磁阻发电机正常运行中突然断相的缺相故障进行了仿真分析。假设 **SRG** 中 **A** 相绕组突然开路,接下来发电机工作在一相缺相运行的状态。图 4-6 是在电机稳定发电以后,0.25s 时 **A** 相突然断相时的电压波形。由仿真结果可以看出,电机突然发生断相故障,电机发电运行经过短暂的波动,发电电压由原来的 306V 波动到一个新的平衡电压值 278V。尽管电压幅值降低纹波增大,但仍能稳定发出直流电。

开关磁阻发电机三相绕组之间耦合小,若某相发生故障,对其他相发电影响很小,所以电机可以继续发电运行。但是缺相运行时电机有效发电绕组减少,发电电压降低。

仿真验证了 **SRG** 在缺相运行中发电可靠性,**SRG** 作为一种具有高容错能力的发电机发展潜能很大。

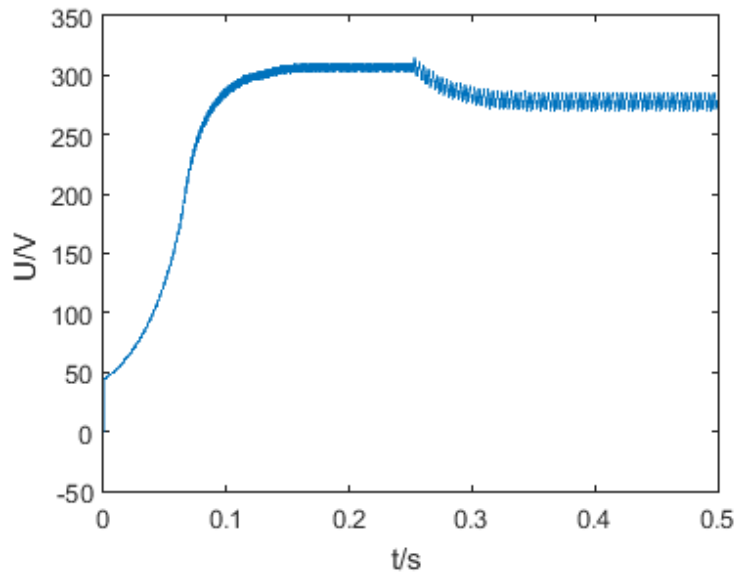


图 4-6 运行中突然断相的输出电压波形图

4.6 本章小结

本章在 Matlab/Simulink 环境下对 SRG 非线性数学模型的不同工作状态进行了仿真研究。依次探究了直流励磁电压、励磁区间、转子转速、稳压电容等参数对 SRG 发电性能的影响，并仿真了缺相运行时供电系统的动态性能。得出下列结论：

（1）开关磁阻发电机在自励模式下的稳态输出电压与起励电压无关，但提高起励电压有利于缩短电机稳定发电的建压过程。起励电压过小会导致电机不能获得足够励磁从而无法发电的情况。

（2）SRG 的输出功率并不是与转速的上升情况正相关，发电机只在一定的转速区间能达到最佳输出功率。

（3）SRG 只能通过控制相绕组的开关角度来控制电机发电电压。适当的延长励磁区间有利于增加磁场储能从而增加系统输出电能。

（4）采用自励模式的开关磁阻发电机供电系统稳定运行时发出直流电。发出的电能可直接接蓄电池储存，也可不整流直接通过逆变设备转化为三相交流电并入电网。

本章针对 SRG 不同参数进行了仿真试验，为开关磁阻发电机的实际实验提供了初步理论指导，仿真结果有待于实测数据的检验。

第 5 章 开关磁阻发电机控制系统的硬件和软件设计研究

开关磁阻发电机结构简单,需要通过比较复杂的控制策略实现对电机发电的控制。这种发电系统优点是电机控制的灵活性较高,但是电机运行控制的复杂性也同时增加。为了避免控制电路过于庞大,需要利用数字控制技术在硬件和软件共同配合下对 SRG 进行控制。SRG 发电机的设计主要包括硬件设计和软件设计,硬件作为控制算法的载体,执行相应的控制功能;由软件编写电机的控制算法,在现代控制理论的指导下,实现控制模式的切换,完善故障诊断、保护等功能。

本章设计了外转子开关磁阻发电机的控制系统,控制核心是 TI 公司的 TMS320F2812 控制芯片。该系统的设计包括硬件和软件两部分,硬件部分包括功率变换器、控制器、位置传感器的设计;软件部分主要是 DSP 控制程序。这两个部分的设计相互配合,共同控制 SRG 发电系统发电。本章将对 SRG 的系统设计方案进行详细的研究。

5.1 系统硬件电路设计研究

本文外转子 SRG 发电系统硬件设计采用模块化设计,提高了系统的稳定性与灵活性,易于功能扩展。其中,控制器以 TI 公司的 TMS320F 系列 DSP2812 芯片为控制核心,负责对输入的各种信号进行处理运算,并向功率驱动器给出驱动信号。该芯片是一款面向运动控制、数字的控制器,具备强大的事件管理功能,能够实现嵌入式控制,被广泛的应用于电机控制领域。该芯片主频速度最高 150MHz,处理数据位数为 32 位定点,内核电源为 1.8V。芯片拥有 EVA、EVB 两个事件管理模块和配套的 12 位 16 通道的 AD 数据采集,对电机的控制得心应手。该芯片具备强大处理能力、丰富片内资源以及较低的功率损耗,因此选择它作为外转子开关磁阻发电机控制系统的核心芯片。

位置信号检测模块将检测到的信号进行隔离处理,传输给控制芯片,该模块是保证控制准确的基础。该模块由永磁体和霍尔元件构成,永磁体安装在转子齿上,霍尔元件固定在定子齿上。在定转子相对运动过程中,二者由于相对位置的变化而感应出不同的信号,从而输出不同的位置信号。

功率模块是执行模块，接收控制系统的控制信号，实现电机的控制。该模块集成了功率电路、驱动电路以及电流和电压的检测等功能，另外还有辅助功能如过流保护和报警电路等。硬件电路的各模块是分离式电路板，通过插件连接成一个整体。

5.1.1 功率变换电路

功率变换模块负责将控制电路输出的驱动信号转化为电机相绕组的通断，从而控制电机的运转，本设计中 SRG 发电系统采用自励发电模式，功率电路选择三相不对称半桥结构，如图 5-1 所示。该结构的主要特点是每相绕组对应两个开关管和两个二极管，控制逻辑相互独立，且相绕组与 IGBT 串联在同一回路，不存在直通问题，无死区。

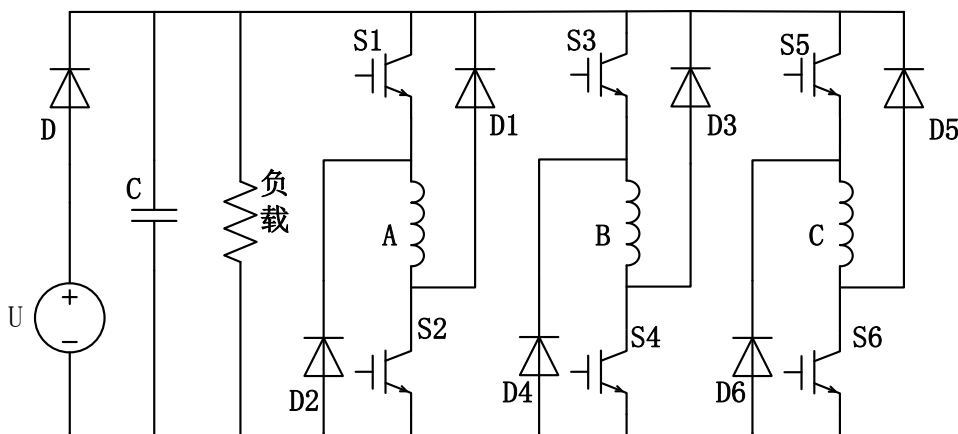


图 5-1 功率电路结构图

本设计中发电机额定电压为 45V，额定电流为 50A，IGBT 功率管最大电流应该按额定值的两倍选择，并留有一定裕量，因此选择 IGBT 元件 SGL160N60UF，该元件具有开关速率高、饱和电压低、输入阻抗高等优点；集电极电压耐压等级为 600V，集电极最高通态电流为 160A，因此在正常过负荷情况下开关管也具有高度安全性。功率二极管选用型号为 DSEI60-12A 的快速恢复二极管，其最高通态电流为 53A，反向击穿电压为 1200V，能够保证系统正常运行。

以 A 相绕组为例，分析电机发电运行时功率元件的通断情况。每相绕组有 2 个 IGBT 功率管和两个二极管。A 相绕组通电时，主开关管 S1、S2 打开，上、下桥臂同时导通。电流流经 S1、A 相绕组、S2，回到电源构成回路。此时 D1、

D2 关断，这一过程为励磁过程；当 A 相主开关管 S1、S2 关断时，绕组电流经 D2、D1 反馈电源，这一过程为续流发电过程。电机三相结构完全相同，原理相同，各相之间独立运行。功率变换电路及相关辅助电路实物如图 5-2 所示。

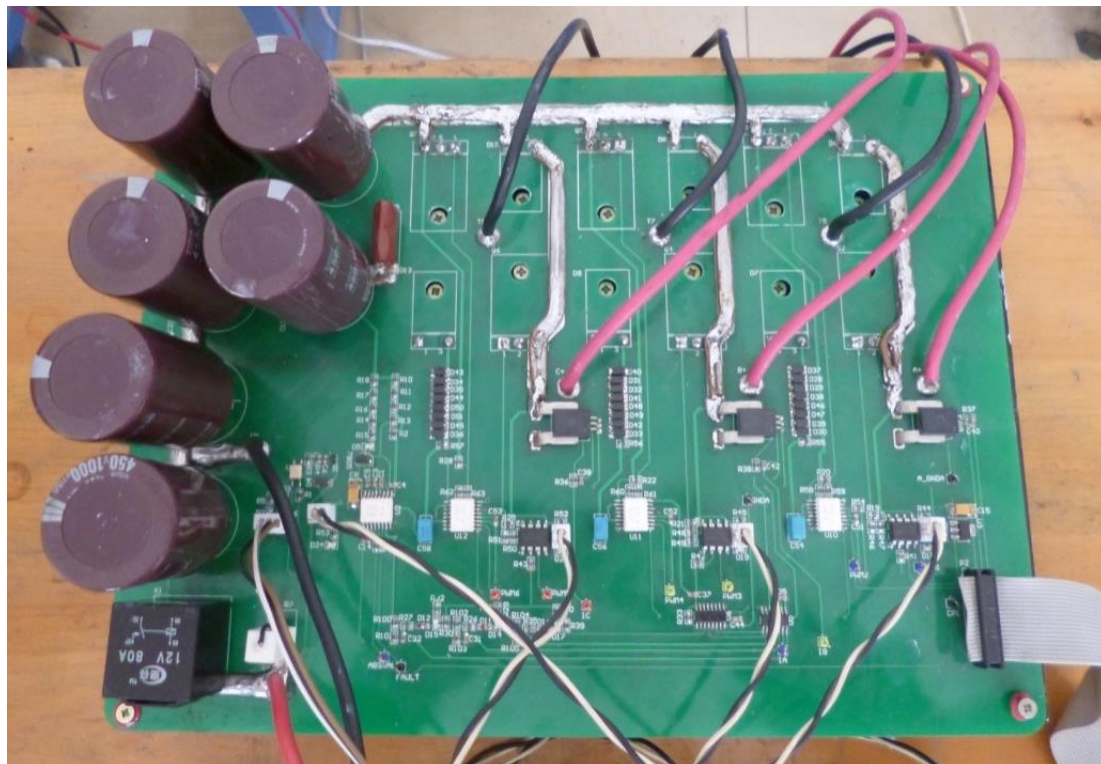


图 5-2 功率电路板实物图

5.1.2 驱动电路

驱动电路是连接主控芯片 DSP2812 与功率变换电路的桥梁，用于将 DSP2812 发出的 PWM 信号放大成能够满足驱动功率变换电路 IGBT 通断的栅射极间电压信号，并实现控制电路和功率电路的电气隔离。通常可以根据 IGBT 的驱动要求，自己选择分立元件灵活搭建驱动电路，具有一定的成本优势，但增加了硬件电路的设计复杂程度，并占用较多的 PCB 板布局空间。

本设计考虑到开关磁阻发电机发电的稳定性和安全性选择了自带保护功能的集成式驱动芯片，与分离式驱动器件相比虽然成本较高、灵活度欠佳，但是具有稳定性高、体积小的优点，更适用于本系统。在使用过程中需要根据芯片的说明配置相应参数。

由图 5-1 所示的功率电路结构图可知，三相上桥臂 3 个 IGBT 的开关电压的基准分别是上桥臂 3 个 IGBT 的发射极，而下桥臂 IGBT 的开关电压的基准则是

母线的地线，因而若要分别驱动图中 6 个 IGBT 的开关，其驱动电路至少需要 4 个相互隔离的驱动电源供电，这将使驱动电源的设计变得十分复杂，而且成本较高，为了简化驱动电路及其供电电源的设计，本设计采用国际整流器公司的 IR2110 驱动芯片来解决这些问题。

IR2110 通过配置自举电路可以同时驱动同一桥臂上下两个 IGBT，三相电路只需同一个供电电源为 IR2110 供电，即可实现对 6 个 IGBT 的驱动。此外驱动芯片 IR2110 本身具备逻辑关断功能和欠压保护功能，驱动芯片如图 5-3 所示。当引脚 11 (SD) 检测到高电平时，将封锁 IR2110，以实现逻辑关断功能。当芯片供电电压，即引脚 3 和引脚 2 间的电压小于阈值时，IR2110 将封锁引脚 7 (HO) 和引脚 1 (LO)，同时关断上下桥臂 IGBT；而且当芯片引脚 6 (VB) 和引脚 5 (VS) 之间的电压小于阈值，将只封锁引脚 7 (HO) 输出信号，关断上桥臂 IGBT。从而从两个角度实现欠压保护功能，提高了系统安全运行的保障。

单个桥臂驱动电路如图 5-3 所示，其中 C44 为自举电容，D15 为自举二极管，这两者用于构成自举电路通过引脚 7 (HO) 驱动上桥臂 IGBT 的开关。由于相绕组串入同一桥臂上下侧两个 IGBT 中间，因而必须同时开通上下桥臂 IGBT 才能使 SRG 电机绕组通电运行，这就要求 SRG 电机启动前已具备同时开通上下桥臂 IGBT 的能力，因而需要对自举电容 C44 进行预充电，以保证能够对上桥臂 IGBT 驱动，充电完成后给定 PWM 信号即可同时驱动电机启动。

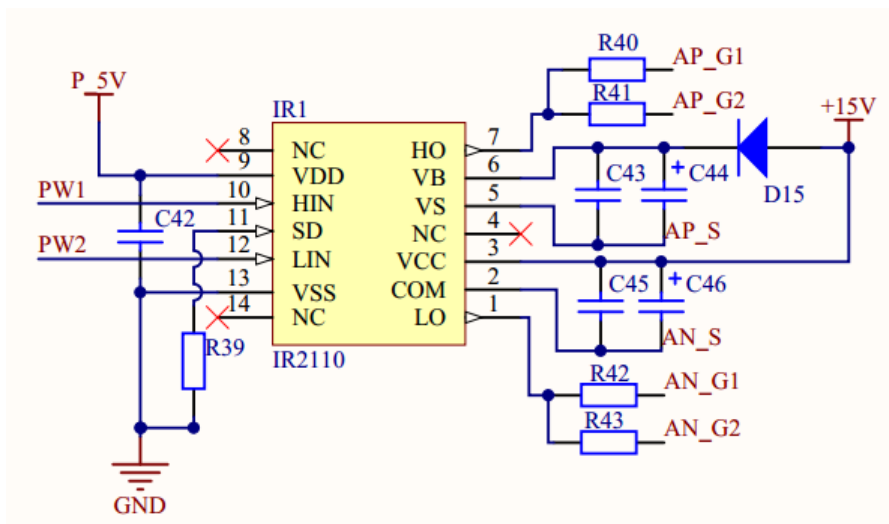


图 5-3 驱动电路原理图

自举电路是驱动电路驱动上桥臂 IGBT 的关键，自举二极管和自举电容的选

择十分重要。本设计采用 IN4148 作为自举二极管，因为其具备 4ns 的反向快恢复能力，可以减少 C44 流回电源的电荷。对于自举电容的选择要考虑两个方面的因素，首先自举电容 C44 要能够为上桥臂 IGBT 提供足够的导通电能，其所能提供电荷量由式（5-1）给出。

$$Q_{bs} = 2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f} \quad (5-1)$$

其次，充满电后的自举电容的电压，在上桥臂 IGBT 导通期间能够保证保证触发 IGBT 开通的要求，而且尽可能保证电压值在导通期间相对稳定，据此，自举电容 C44 的容值选择要满足式（5-2），而且实际电路中自举电容值选择为此最小值的 2 倍。

$$C \geq \frac{2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f}}{V_{CC} - V_f - V_{LS} - V_{min}} \quad (5-2)$$

其中， Q_g 为上桥臂 IGBT 电荷； $I_{cbs(leak)}$ 为 C44 的漏电流； Q_{ls} 为在一个周期中电平转换的电荷； V_f 为 D15 正向的电压降； V_{min} 为欠压保护电压阈值； V_{LS} 为电机绕组和下桥臂 IGBT 的总压降。

5.1.3 电流检测电路

在控制 SRG 电机运行时，需要获取电机电流值，才能够实现电机的控制的控制算法驱动电机运行。而且为了检测电机运行过程可能出现的过电流情况，也需要对电流进行检测。

由于电流检测作用至关重要，在设计电流检测电路时要尽可能实时准确的测取电流，因而选取的电流检测传感器要能够满足延时短、精准的优点。同时从电气安全的角度上考虑，要把检测电路从大功率的绕组电流中隔离出来。基于上述考虑，本设计选用 Allegro 公司的 ACS758 电流传感器集成芯片。

ACS758 电流传感器集成芯片的结构如图 5-6 所示，该芯片是一个带 $100\mu\Omega$ 电流导体的基于霍尔电路的线性电流传感器 IC，超低功耗，绝缘设计能够实现性价比高的高端电流检测，并把检测得到的电流信号转变成成比例的电压信号输出，工作电源范围为 3.0~5.5V，典型带宽为 120kHz，具备极稳定的输出电压偏置等优点，可以较好满足本设计对检测电路的要求。

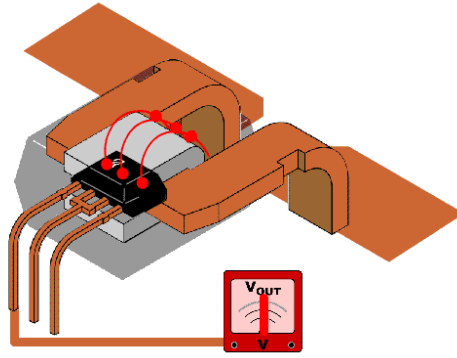


图 5-6 电流传感器结构图

ACS758 电流传感器具体接线图如图 5.7 所示，由引脚 1 (VCC) 和引脚 2 (GND) 提供+3.3V 工作电压，通过引脚 4 (IP+) 和引脚 5 (IP-) 接入所要检测的电流导线中，引脚 3 (VIOU) 则为传感器二次侧输出电压出口，其中电源和地引脚间接入 0.1 μ F 的旁路电容，输出引脚和地之间接入 RC 低通滤波器用以过滤输出电压高次谐波。

本设计中选用的电流传感器具体型号为 ACS758-100U，量程为 100A，单向电流传感器。在实际硬件电路应用中，因为存在磁滞和热漂移现象，会对测量精度有一定影响，当输入电流为零时电压输出存在 0.1*VCC 的偏移，为了更精确测量电流，可以根据硬件电路实际情况对测量值进行校正。

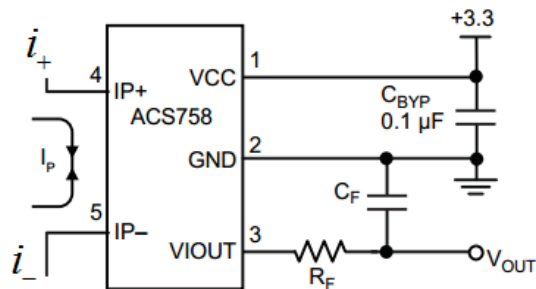


图 5-7 电流传感器接线图

5.1.4 冲击电流抑制

在电机启动之前，对控制器上电的瞬间，由于逆变器尚未运行处于断开状态，电源直接通过保险丝、母线对电容进行充电，将会产生很大的冲击电流，对硬件电路元件产生冲击。因此，为了抑制冲击电流，保护硬件元件，保障控制器可靠性，通常在电路中串入负温度系数的温敏电阻或者先加入限流电阻在电机运行到

稳态后切除。

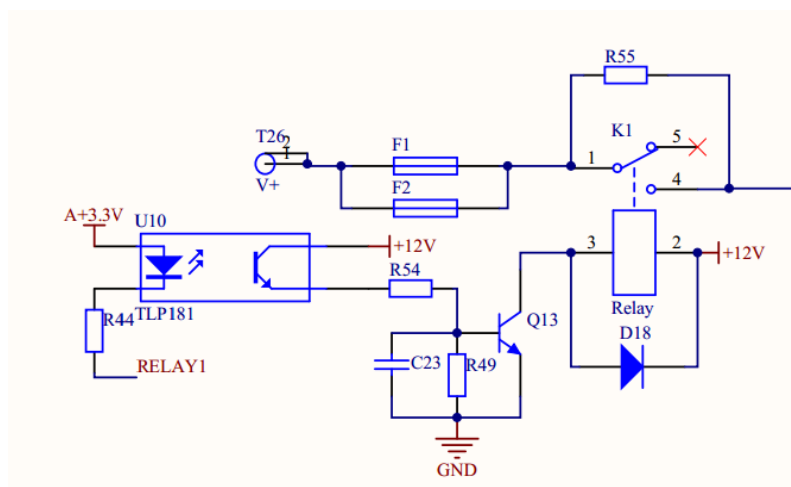


图 5-8 冲击电路结构图

本设计中选用第二种方法，具体抑制电路如图 5-8 所示。其中 R55 即为限流电阻，并联在继电器开关引脚的两端。而继电器的控制信号通过三极管 Q13 施加到继电器引脚 3，并且通过光耦元件 TLP181 与 Q13 实现电气隔离，继电器供电电压为+12V。在控制器上电后，电阻投切信号 RELAY1 为低电平，Q13 关断，继电器开关打到引脚 5，主电路接入限流电阻 R55。当进入稳态后，RELAY1 信号翻转，Q13 开通，继电器开关闭合到引脚 4，将限流电阻 R55 短路切除。这样即可满足抑制冲击电流的要求。

5.1.5 位置检测

在外转子开关磁阻发电机的控制中，功率电路中开关的通断位置的选择和计算都需要对转子位置的测量，因此测量位置的电路应该设计的尽量稳定、抗干扰能力强、可在各种工况下可靠工作。对位置的测量可采用传感器：采用码盘的光电编码器、由遮光板与光电脉冲发生器组成的光电位置传感器、由霍尔元件和永磁体组成的霍尔位置传感器。

鉴于霍尔位置传感器感应灵敏、占有空间少的优点，本文在外转子 SRG 电机上采用了霍尔位置传感器检测转子位置。转子齿上安装 32 块永磁体，定子齿固定六个霍尔元件。发电机运行时，霍尔集成电路与永磁体之间不断被触发叶片隔开，检测出高低电平各占半个周期的位置信号，U1、U2、U3 三个检测信号对应于 A、B、C 三相绕组，相位互差 120°，确定转子相对与定子的位置。

霍尔电路产生方波信号经屏蔽电缆接入控制电路，为了提高系统的可靠性，控制电路采用光电隔离的方式接收位置信号。该模块将传感器产生的 5V 的电平信号转化成 3.3V 输入到 DSP 中。位置信号接收电气接线图如图 5-9 所示。

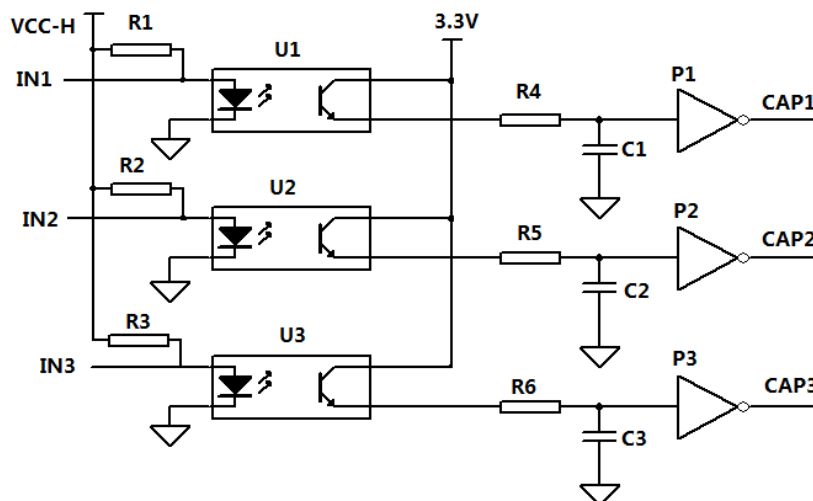


图 5-9 位置信号接收电路图

5.2 系统软件设计

硬件是算法实现的基础，软件是控制策略的核心。本节基于上一节建立的外转子 SRG 发电系统硬件系统，设计了相应的软件部分。软件的编译在软件 CCS 中完成，并通过 JTAG 接口将程序下载到 DSP 芯片中。软件由 C 语言和少量汇编语言构成。代码的编写不仅需要考虑硬件控制逻辑的实现，也要考虑硬件的结构和语句运行的效率，以及整个程序的易读性与易维护性。本节设计了软件的执行流程。

5.2.1 软件部分总体结构

模块化编程能够提高程序的易读性和扩展能力，本设计将主要功能分别用不同程序来完成，包括电流采集程序，生成 PWM 子程序、界面交互子程序以及故障检测子程序等。通过将主函数与中断函数中不断调用各子程序模块，最终实现发电系统的正常工作。

TMS320F2812 芯片为定点型处理器。进行小数运算时编程复杂，需花费大量时间，通过使用 TI 官方给出的 IQmath 库函数，能够极大提高代码执行效率并节省编程时间。调用函数，其特定的移位操作可以将浮点型数据转换成定点型数

据，从而实现浮点型数据的运算，系统的编程效率较高。由于电流、电压等变量的变化幅度不同，程序设定统一的 IQ 值可能导致某些变量运算精度减小，而各变量单独设定 IQ 值会导致编程复杂，本课题中对各变量进行标么化。在程序初始对各变量的基准值进行了宏定义，在算数运算中使用各变量的标么值，标么值的使用使模块化编程变得简便易行。

在软件设计程序编写时对结构体、指针、位域进行合理的定义，运行过程中函数的适当调用能够提高系统运行的效率，简化文件的管理。

5.2.2 功能模块设计

1. 系统主程序的设计

DSP 上电运行后，随即进入主程序，首先执行初始化子函数，对各个功能寄存器进行配置，如设置定时器周期、配置各引脚功能等，之后进入不断扫描系统状态的循环过程，包括电压值、电流值检测、按键检测、位置检测以及标志位检测等，并根据测得状态决定电机如何运行。执行过程如图 5-10 所示。

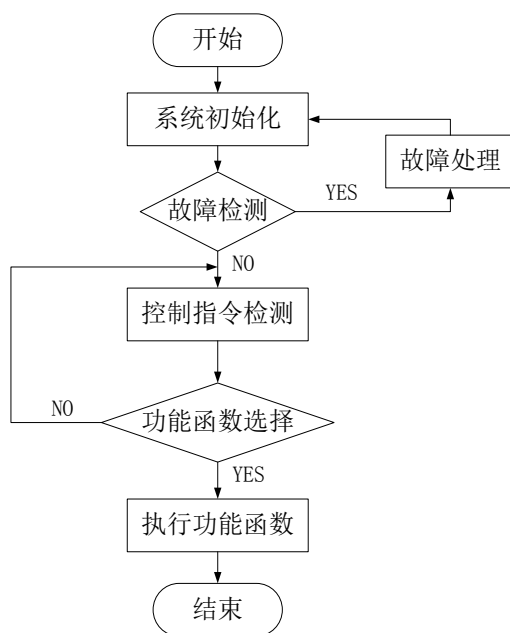


图 5-10 主程序流程图

系统时钟频率的配置在初始化模块中完成，使用芯片自带的倍频电路，将外部输入的 30MHz 晶振频率倍频到 150MHz，这是芯片所能达到的最高时钟频率。根据系统的工作频率，系统时钟 SCLK 与晶振频率 OSC 的关系应满足式(5-3)：

$$\begin{cases} SCLK = OSC * m/2 & (m \neq 0) \\ SCLK = OSC & (m = 0) \end{cases} \quad (5-3)$$

该系统具有软件保护功能，当主程序检测到电流或电压值异常时，PWM 输出信号将被封锁，同时报警子程序启动，控制系统执行相应的保护功能。系统具备较高的安全性。

2. 位置检测程序

转子位置信号的准确获取与解读是电机控制的基础，位置信号有三路，分别连接到事件管理器的 CAP 引脚上，电机初始运行状态是由 11 引脚上输入的电平高低来判断的。电平状态共有六种，表示转子所在不同区间，电机运行过程中，位置传感器输出信号发生突变，从而触发 CAP 中断，进入中断服务子程序进行位置判断与速度计算。位置检测流程如图 5-11 所示。

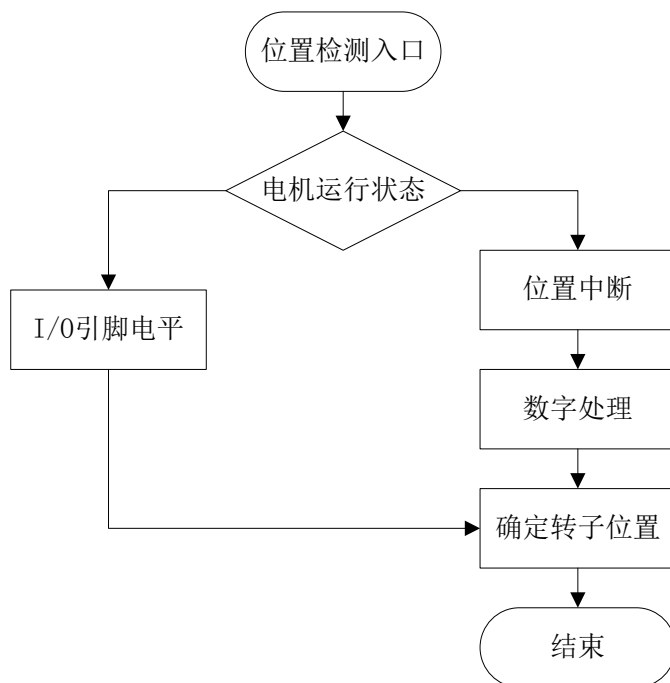


图 5-11 位置检测流程图

利用示波器和电压探头等电气设备可检测霍尔元件位置信号的安装的准确性，经过检测无误后可绘制电感与位置信号二者的相对位置关系曲线，位置关系曲线如图 5-12 所示。

该曲线使电感与位置信号的关系更加明了，使 SRG 的准确控制更简明、快捷。由此对应关系可以确定程序设计，实现正确的通断电流。

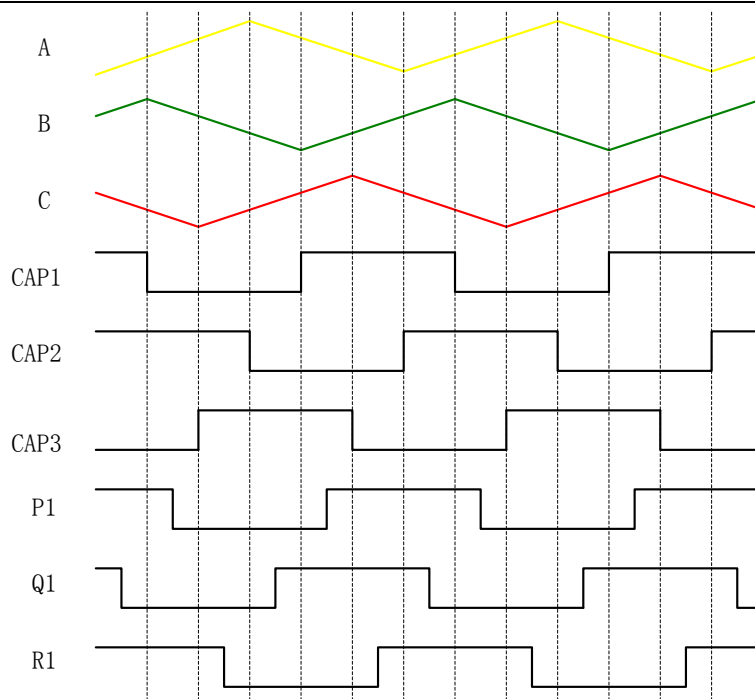


图 5-12 电感与位置信号关系曲线

3. 模拟采样部分

相对于开关信号等数字量，输入 DSP 芯片的模拟量包括电压信号、电流信号等，将这些信号线接到 ADC 引脚上，由处理器将其转换成数字量并由结果寄存器存入相应变量。DSP 芯片集成了 16 路 AD 转换功能，对相关的寄存器按照规程进行配置，然后在相应的结果寄存器中得到需要的数据。AD 采样流程如图 5-13 所示。

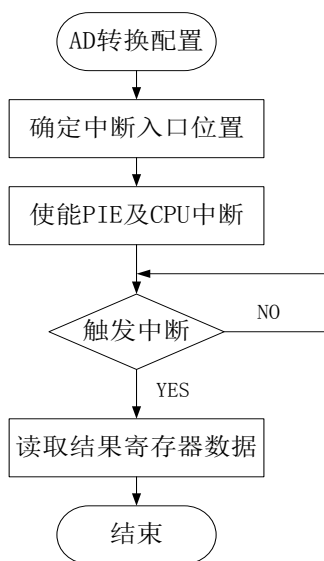


图 5-13 AD 采样流程图

ADC 模块的采样周期通过相应寄存器来配置,其采样频率能够达到 25MHz。系统应根据需要选择合适的时钟频率,其计算过程如式(5-4):

$$\begin{cases} ADCLK = HCLK / (CPS + 1) & (ADCPS = 0) \\ ADCLK = \frac{HCLK}{2 \times ADCPS \times (CPS + 1)} & (ADCPS \neq 0) \end{cases} \quad (5-4)$$

获取准确的数据的关键是配置合适的采样频率,实际应用中,应对系统的采集窗口进行合理的配置。

4. PWM 模块

SRG 的发电运行采用了脉宽调制控制策略,占空比是不断变化的。DSP 中有生成 PWM 信号的比较模块,通过软件编程中 PWM 生成单元的配置,可输出需要的脉宽调制波形。PWM 模块流程如图 5-14 所示,比较单元生成 PWM 的原理如图 5-15 所示。

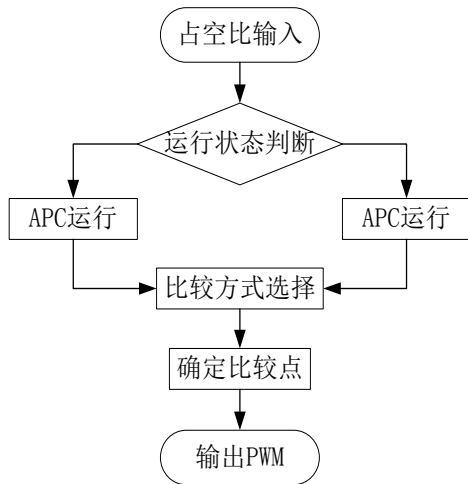


图 5-14 PWM 模块流程图

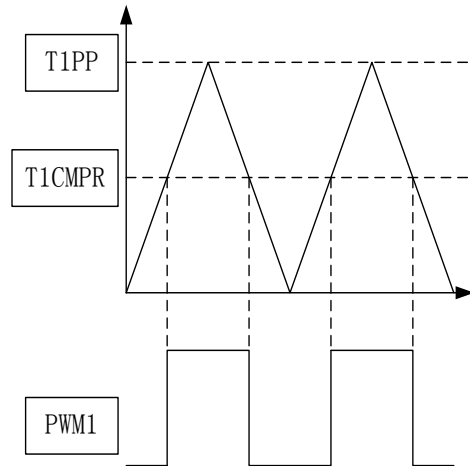


图 5-15 PWM 生成原理图

设置比较单元的高电平输出有效,由式(5-5)可计算 PWM 输出的频率。

$$f_p = \frac{TCLK \times 10^6}{2 \times T1PR} \quad (5-5)$$

其中, T1PR 为周期寄存器的值; TCLK 为定时器 T1 的时钟频率,单位 MHz。

5.3 外转子开关磁阻发电系统实验及分析

本章在仿真和硬件软件设计的基础上,开发了外转子开关磁阻发电机发电实验平台,对外转子 SRG 发电系统进行相关实验,通过实验验证系统设计的正确性,改善控制方法。

5.3.1 测试装置介绍

外转子 SRG 发电系统实验系统由原动机模拟风轮机，提供机械能，带动开关磁阻发电机旋转，原动机部分为变频器控制速度的交流异步电机。外转子 SRG 与原动机（异步电机）同轴安装因此转速为原动机转速。

图 5-16 为外转子 SRG 发电系统电机部分实验装置图。控制器控制 SRG 开关角，使开关磁阻发电机将原动机输入的机械能转化为电能输出。控制器通过屏蔽线接收 SRG 的位置信号。多功能直流电源为控制电路和 DSP 芯片等供电。

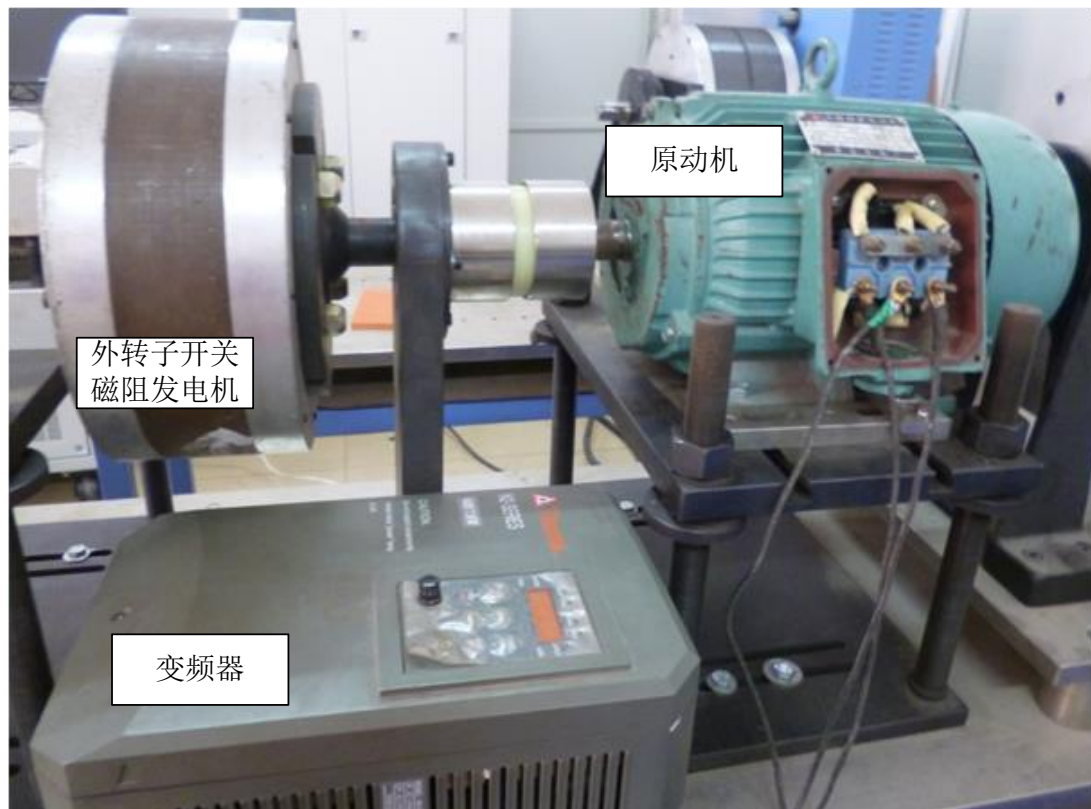


图 5-16 外转子 SRG 发电系统电机部分实验装置图

图 5-17 为外转子 SRG 发电系统控制部分实验装置图。直流电源为电机的功率电路和控制电路提供电源。功率电路和控制电路通过排线交换数据，同时实现电隔离。

图 5-18 为外转子 SRG 发电系统控制电路及辅助电路。电机的位置信号通过光缆隔离输入到控制电路中，控制电路对信号进行处理比对通过 DSP 中软件程序实现对电机的控制。

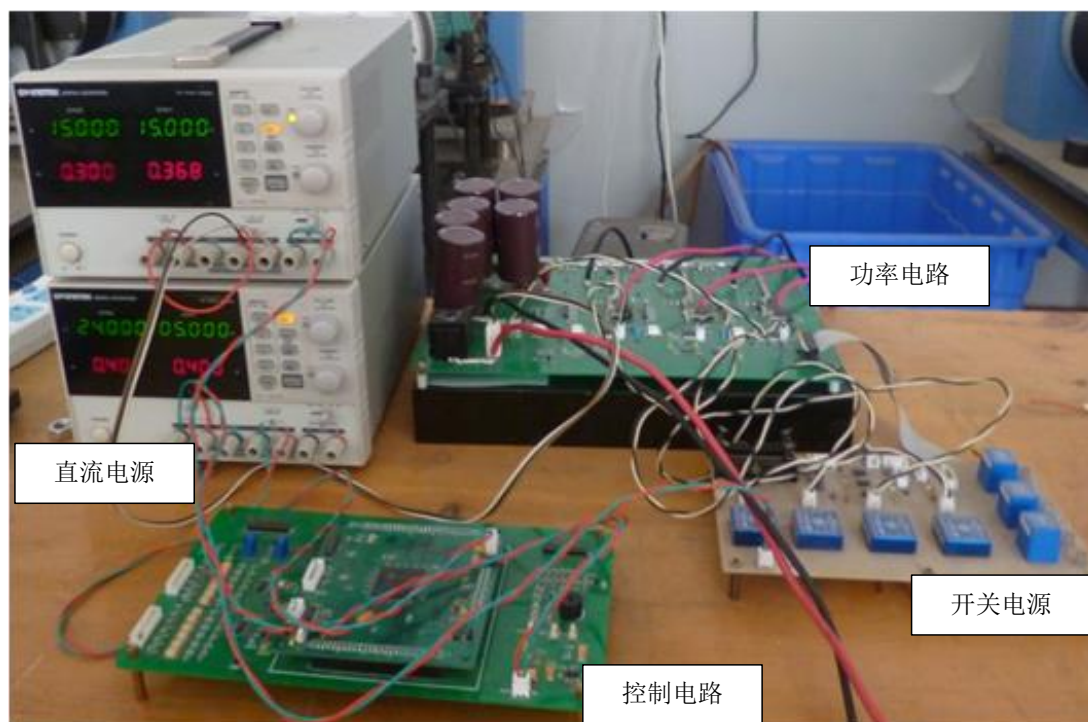


图 5-17 外转子 SRG 发电系统控制部分实验装置图

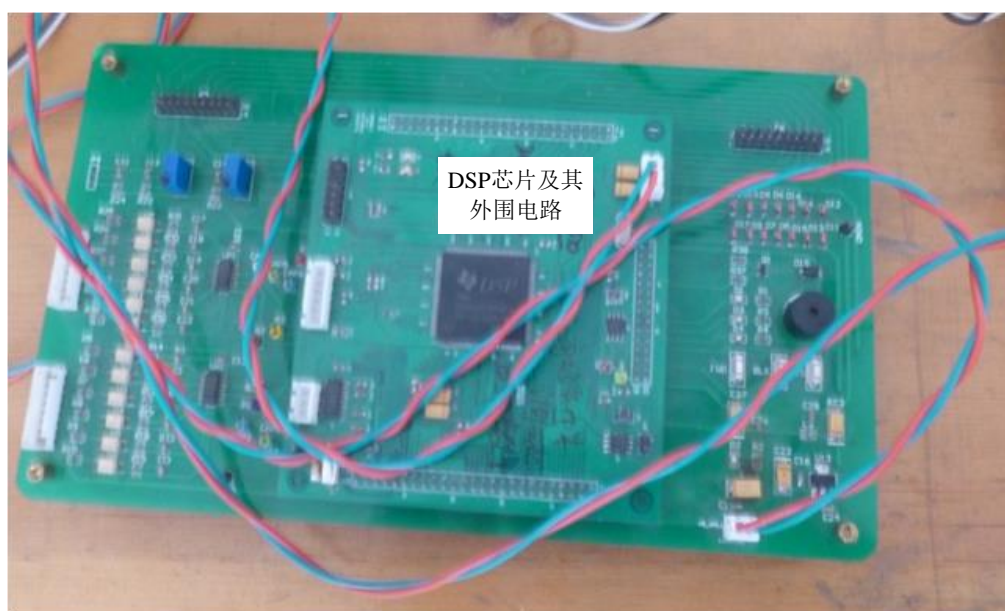


图 5-18 外转子 SRG 发电系统控制电路实验装置图

5.3.2 位置信号检测

检测到正确的位置信号是电机正常运行的基础。控制电机相绕组开通和关断的时刻，直接关系到电机的励磁区间的能量储存，因此说位置信号检测影响 SRG 发电系统的发电性能。位置信号波形如图 5-19 所示。

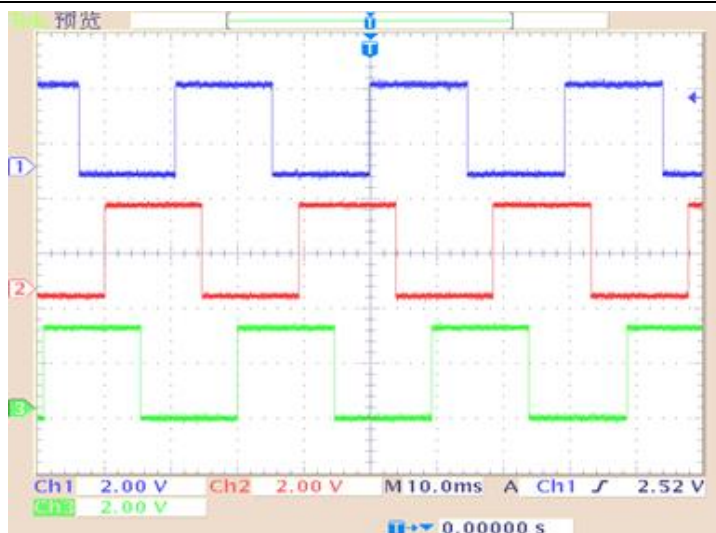


图 5-19 位置信号波形图

由位置信号波形图可以看出，三组信号分别代表 A、B、C 三相绕组位置信号，周期相同，相位依次相差 120° ，其中高低电平分别占半个周期。

5.3.3 功率元件测试

电机运行过程中 IGBT 和功率二极管不断切换导通、关断状态，掌握功率元件的运行状态是判断相绕组是否正常运行的依据。在母线电压 100V、占空比为 0.5 时对功率元件进行测试，图 5-20 为功率元件波形图。其中通道 1 和通道 4 分别是 IGBT 功率开关管 S1 和功率二极管 D2 两端的电压波形。

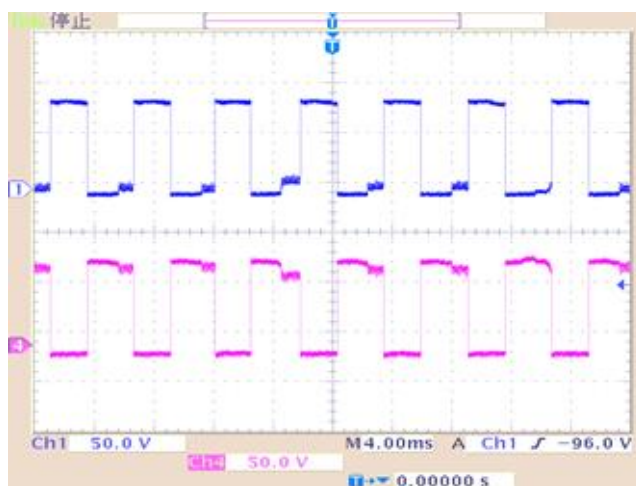


图 5-20 功率元件波形图

S1 导通时，D2 截止，S1 两端电压近似为母线电压；S1 关断时，由于电流不能突变，相电流通过 D1、D2 续流。随着续流过程的进行，电流逐渐减小使 D2 分担的电压逐渐增大。因此集电极和发射极之间的电压在续流开始瞬间两端

电压为最大值；随着相电流消耗至 0，集、射极间的电压下降，约为电源电压的一半。若控制信号占空比变化，集、射极通断情况也将改变。图 5-21 和图 5-22 为门、射极及集、射极两端的电压波形及其局部放大波形。

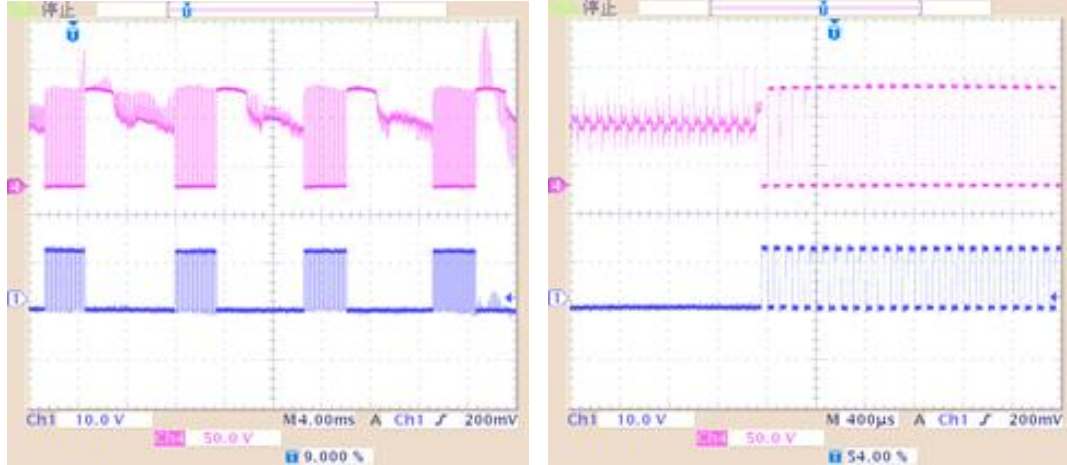


图 5-21 集、射极和门、射极端电压波形图 图 5-22 集、射极和门、射极局部端电压波形图

5.3.4 外转子开关磁阻发电系统的发电性能测试

在外转子开关磁阻发电系统实验平台上进行发电实验，可验证电机控制策略是否合理；也能验证硬件设计和软件设计的正确与否。设定外电路起励电压 45V，开通角 7°，关断角 14.5°，负载 100Ω，在电机转速为 1000r/min 的条件下进行了发电实验。实验结果如以下波形所示：图 5-23 为 A 相电流波形，由于采用电流斩波控制方法，电流达到 40A 以上时，被斩波；图 5-24 为稳定发电电压波形，电压约为 150V。系统能发出直流电，但是幅值与仿真结果有较大误差。需要下一步工作时对硬件软件的设计作出改进。

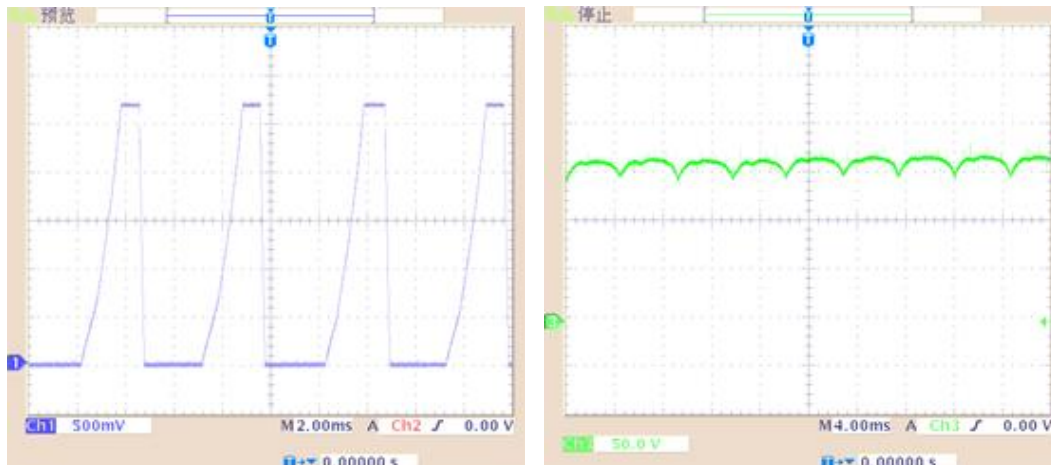


图 5-23 发电时相电流波形图

图 5-24 发电时电压纹波波形图

5.4 本章小结

本章对外转子开关磁阻发电机发电系统的硬件和软件结构进行了设计, 硬件部分设计了以 DSP 芯片为核心的控制器, 结合了电流检测、位置检测、保护电路等多个扩展模块的功率电路; 软件部分在硬件的基础上, 采用统一的结构编写了功能函数, 以实现 SRG 电机的运行控制和系统保护。

在外转子开关磁阻发电系统实验平台上进行了相关信号测试和器件的功能测试, 并进行了发电实验。系统能够稳定发出直流电能, 下一步工作的改进方向是改善发电电压波形, 提高发电电能质量。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文工作的总结

风能是一种清洁可再生的能源。在能源短缺和环境污染这两大问题越来越严重的当今世界，风力发电成为各国研究的一个重点。本文主要围绕开关磁阻发电机在小型直驱风力发电中的应用，展开了一系列理论实践的探索，现将本文的主要研究内容和所得到的结论如下：

(1) 参考研究大量文献和资料，分析了开关磁阻发电机风力发电系统的优势。阐述了开关磁阻发电机的基本结构特点、运行原理，介绍了 SRG 自励发电和他励发电两种发电模式，总结了开关磁阻发电机的四种控制方法。

(2) 基于电磁场有限元分析得出的 SRG 不同定转子位置处的磁化曲线，在 Matlab/Simulink 软件环境中建立了 12/16 极外转子开关磁阻发电机的非线性数学模型。同时采用电磁场的有限元方法对外转子 SRG 进行了发电过程进行了仿真，以验证基于 Matlab 软件仿真模型的正确性。Matlab 数学模型稳定建压时电压平均值比有限元模型电压平均值约高 3%。Matlab/Simulink 模型是在非线性电机模型的基础上根据数学关系得到，Ansoft/Maxwell 2D 模型是对电机整体有限元剖分进而进行场的计算。算法不同导致了两种建模仿真结果有所差异，但是误差值很小，由此可以验证在 Matlab/Simulink 环境下建立的外转子 SRG 模型是正确的，可以用于不同条件下的电机性能的快速仿真。

(3) 对基于建立的 Matlab 模型进行了仿真研究，研究开关磁阻发电机的控制策略和输出特性。探讨了不同参数对开关磁阻发电机供电系统的影响，同时对开关磁阻发电机系统的缺相故障进行仿真分析。仿真研究表明：开关磁阻发电机在自励模式下的稳态输出电压与起励电压无关，但起励电压高有利于缩短电机稳定发电的建压过程。SRG 的输出功率并不是与转速的上升情况正相关，只在一定的转速范围能达到最佳输出功率。通过控制励磁阶段的相绕组开通关断角可以控制输出的电能。

(4) 最后本文围绕现有开关磁阻电机控制系统搭建发电系统实验台，设计了样机控制系统的硬件和软件，其中包括功率电路、DSP 最小系统及其外围控制

电路及开关电源等。展示了实验平台实物，在此平台上进行了相关信号测试和器件的功能测试，并进行了发电实验。实验结果表明，系统可发出稳定的直流电，验证了控制策略的有效性。在自励模式下开关磁阻发电机发电系统稳定运行能够发出直流电。发出的电能可直接接蓄电池储存，也可不整流直接通过逆变设备转化为三相交流电并入电网。

6.2 下一步工作展望

由于时间和实验条件等限制，对外转子开关磁阻发电系统的研究工作还有不足之处，在以下两个方面还需要更深入的研究：

（1）虽然开发的外转子 **SRG** 实物发电系统能够发出稳定的直流电压，但是其幅值与仿真实验中的结果有一定的误差，还需要进一步校验硬件设备，调试软件程序，以谋求更高的发电质量。

（2）风力发电的最终目标是获得高质量的电能并入电网，这需要在各种扰动下 **SRG** 发电系统能正确反馈，维持稳定地电能输出。因此后续需要研究系统电压闭环控制功能，采取合适的控制策略控制电机运行。

参考文献

- [1] 胡海燕, 潘再平. 开关磁阻风力发电系统研究[J]. 浙江大学, 2005.
- [2] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽, 等. 开关磁阻发电机用于直接驱动, 变速运行风力发电系统的评估[J]. 太阳能学报, 2005, 26(3): 386-390.
- [3] 张宪平, 潘磊, 秦明. 开关磁阻发电机在风力发电系统的应用[J]. 大功率变流技术, 2011 (3): 20-24.
- [4] 何祚庥, 王亦楠. 风力发电——我国能源和电力可持续发展战略的最现实选择[J]. 自然辩证法研究, 2005, 20(10): 80-85.
- [5] Cardenas R, Ray W F, Asher G M. Switched reluctance generators for wind energy applications[C]//Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC'95 Record., 26th Annual IEEE. IEEE, 1995, 1: 559-564.
- [6] Stiebler M. Wind energy systems for electric power generation[M]. Springer Science & Business Media, 2008.
- [7] 赵守景, 蔡莹波. 风电企业区域机构整合及人力资源优化配置工作研究[J]. 人力资源管理, 2014 (9): 77-78.
- [8] 解召辉. 风力发电的发展现状及前景[J]. 农村电气化, 2009 (6): 53-55.
- [9] 林显军, 程小华. 开关磁阻风力发电技术[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(9): 46-50.
- [10] 张新房, 徐大平, 吕跃刚, 等. 风力发电技术的发展及若干问题[J]. 现代电力, 2003, 20(5): 29-34.
- [11] 明夫, 加施, 特韦勒. 风力发电技术[M]. 西北工业大学出版社, 2009.
- [12] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 62-67.
- [13] Hu K W, Wang J C, Lin T S, et al. A Switched-Reluctance Generator With Interleaved Interface DC--DC Converter[J].
- [14] 黄科元, 贺益康. 矩阵式变换器交流励磁的变速恒频风力发电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 100-105.
- [15] 宋海辉. 风力发电技术及工程[M]. 中国水利水电出版社, 2009.

-
- [16] Jain P. Wind energy engineering[M]. McGraw Hill Professional, 2010.
- [17] Radun A. Generating with the switched reluctance motor[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1994. APEC'94. Conference Proceedings 1994., Ninth Annual. IEEE, 1994: 41-47.
- [18] Heglund W S, Jones S R. Performance of a new commutation approach for switched reluctance generators[C]//Energy Conversion Engineering Conference, 1997. IECEC-97., Proceedings of the 32nd Intersociety. IEEE, 1997, 1: 574-579.
- [19] 李声晋, 李钟明. 4kW 开关磁阻发电机[J]. 西北工业大学学报, 1999, 17(2): 327-331.
- [20] Sawata T, Kjaer P C, Cossar C, et al. A study on operation under faults with the single-phase SR generator[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1999, 35(4): 782-789.
- [21] Ferreira C A, Jones S R, Heglund W S, et al. Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1995, 31(3): 553-561.
- [22] Radun A V, Ferreira C A, Richter E. Two-channel switched reluctance starter/generator results[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 1998, 34(5): 1026-1034.
- [23] Potgieter C, Hope W, Gregory E. Magnetic bearing controls for a high speed, high power switched reluctance machine (SRM) starter/generator[J]. Aerospace Engineering, 2000, 2007: 0917.
- [24] Radun A, Richter E. A detailed power inverter design for a 250 kW switched reluctance aircraft engine starter/generator[J]. Training, 1993, 2014: 04-15.
- [25] Gameiro N S, Cardoso A J M. Analysis of SRM drives behaviour under the occurrence of power converter faults[C]//Industrial Electronics, 2003. ISIE'03. 2003 IEEE International Symposium on. IEEE, 2003, 2: 821-825.
- [26] Baker D E. DC Link VSCF Starter/Generator Systems[J]. Safety, 1987, 2011: 01-01.
- [27] MacMinn S R, Sember J W. Control of a switched-reluctance aircraft engine

- starter-generator over a very wide speed range[C]//Energy Conversion Engineering Conference, 1989. IECEC-89., Proceedings of the 24th Intersociety. IEEE, 1989: 631-638.
- [28] 严加根. 航空高压直流开关磁阻起动/发电机系统的研究 [D]. 南京航空航天大学博士学位论文, 2006.
- [29] Mese E, Sozer Y, Kokernak J M, et al. Optimal excitation of a high speed switched reluctance generator[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE. IEEE, 2000, 1: 362-368.
- [30] Brown G V, Kascak A F, Ebihara B, et al. NASA Glenn Research Center program in high power density motors for aeropropulsion[J]. 2005.
- [31] 黄翌, 易灵芝, 彭寒梅, 等. 基于双 PWM 变换器的开关磁阻风力发电系统研究[J]. 计算机仿真, 2010 (2): 269-273.
- [32] 邱鑫, 张卓然, 朱德明, 等. 双凸极无刷直流发电机在开关磁阻发电方式下的工作特性[J]. 中国电机工程学报, 2010 (21): 54-60.
- [33] 刘卫国, 宋受俊. 无位置传感器开关磁阻电机初始位置检测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(24): 91-97.
- [34] 周强. 高速开关磁阻电机的关键技术研究与实践[D]. 南京航空航天大学, 2009.
- [35] 李声晋, 卢刚. 开关磁阻发电系统数学建模[J]. 电工技术学报, 2001, 16(4): 1-6.
- [36] 张慧. 开关磁阻发电机系统的研究[J]. 浙江大学工学硕士学位论文, 2003, 1: 1-14.
- [37] 胡海燕, 潘再平. 开关磁阻风力发电系统研究[J]. 浙江大学, 2005.
- [38] 魏然. 开关磁阻发电机发电系统设计研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2012. 58
- [39] 杨丽伟, 张奕黄. 基于 Ansoft 的开关磁阻电机建模与仿真[J]. 电机技术, 2007 (3): 13-16.
- [40] 贾好来, 姜晋文, 王振民. 高压大功率开关磁阻电机功率变换器设计[J]. 高电压技术, 2009 (7): 1718-1723.
- [41] 吴建华, 电机. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 机械工业出版社, 2000.

- [42] 张慧, 潘再平. 开关磁阻发电机励磁模式的理论分析与仿真[J]. 太阳能学报, 2004, 25(2): 162-170.
- [43] 匡哲, 王双红, 孙剑波. 高速开关磁阻发电机励磁参数优化控制[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(2): 128-132.
- [44] 李声晋, 卢刚. 开关磁阻无刷发电机自励磁机理[J]. 微电机, 2000, 33(5): 10-11.
- [45] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术[M]. 机械工业出版社, 1995.
- [46] 陈昊, 谢桂林. 开关磁阻发电机系统研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(6): 7-12.
- [47] 刘闯, 朱学忠. 开关磁阻发电机的脉宽调制控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(1): 1-5.
- [48] 朱学忠, 刘闯. 开关磁阻电机发电运行的角度位置控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(1): -64-67.
- [49] 任贵勇, 王常虹. 开关磁阻电机的发电运行及其数字仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): -29-32.
- [50] 李卫平, 彭寒梅, 易灵芝. 小型开关磁阻风电系统优化仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(2): 336-340.
- [51] 刘震, 林辉, 司利云. 开关磁阻发电系统的故障分析及仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 17(5): 7-11.

附录：外转子开关磁阻发电机系统控制软件主程序

```
/*
=====
=====
File name:          SRG_FUN.C   (IQ version)

Originator:   LH

Description:

=====
=====*/

void READ_KEY_calc(READ_KEY *v)
{
    v->KeyFwd=!GioDatRegs.GPFDAT.bit.GPIOF1;
    v->KeyRvs=!GioDatRegs.GPFDAT.bit.GPIOF11;
    v->KeyStop=!GioDatRegs.GPFDAT.bit.GPIOF13;

    if(v->KeyFwd==1)    {v->FlagTemp1=1;}else{v->FlagTemp1=0;}
    if(v->FlagTemp1==1) {v->RunState=FWD_STATE;ON_FWD;OFF_RVS;OFF_BLK;}

    if(v->KeyRvs==1)    {v->FlagTemp2=1;}else{v->FlagTemp2=0;}
    if(v->FlagTemp2==1) {v->RunState=RVS_STATE;OFF_FWD;ON_RVS;OFF_BLK;}

    if(v->KeyStop==1)   {v->FlagTemp3=1;}else{v->FlagTemp3=0;}
    if(v->FlagTemp3==1) {v->RunState=STOP_STATE;OFF_FWD;OFF_RVS;ON_BLK;}
}
/*=====
=====*/

void STC1_calc(STC1 *v)
{
    extern Uint16 FLAG_CAP1,   FLAG_CAP2, FLAG_CAP3;
    extern SPEED_MEAS1_CAP spd_meas1;
    extern APC1 apc1;

    v->FlagStc=1;
    apc1.FlagApc=0;

    if(v->RunState==FWD_STATE)
```



```

{
    if(spd_meas1.SpeedRpm<SPD_BORDER)
    {
        v->HallData1=GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA13;
        v->HallData2=GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA12;
        v->HallData3=GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA11;
        v->HallData4=GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA14;
        v->HallData5=GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA15;
        v->HallData6=GioDatRegs.GPBDAT.bit.GPIOB14;

        if(spd_meas1.SpeedRpm<800)
        {
            // if((v->HallData5==0)&&(v->HallData4==1)){v->FlagStartPhase2=1;}
            else {v->FlagStartPhase2=0;}
            // if((v->HallData6==0)&&(v->HallData5==1)){v->FlagStartPhase1=1;}
            else {v->FlagStartPhase1=0;}
            // if((v->HallData4==0)&&(v->HallData6==1)){v->FlagStartPhase3=1;}
            else {v->FlagStartPhase3=0;}
            if((v->HallData1==0)&&(v->HallData2==1)){v->FlagStartPhase3=1;}
            else {v->FlagStartPhase2=0;}
            if((v->HallData3==0)&&(v->HallData1==1)){v->FlagStartPhase1=1;}
            else {v->FlagStartPhase1=0;}
            // if(v->HallData1==1){v->FlagStartPhase3=1;} else {v->FlagStartPhase3=0;}
            // if(v->HallData2==1){v->FlagStartPhase1=1;} else {v->FlagStartPhase1=0;}
            // if(v->HallData3==1){v->FlagStartPhase2=1;} else {v->FlagStartPhase2=0;}
            // if((v->HallData1==1)&&(v->HallData5==0)){v->FlagStartPhase2=1;}
            else {v->FlagStartPhase2=0;}
            // if((v->HallData2==1)&&(v->HallData6==0)){v->FlagStartPhase1=1;}
            else {v->FlagStartPhase1=0;}
            // if((v->HallData3==1)&&(v->HallData4==0)){v->FlagStartPhase3=1;}
            else {v->FlagStartPhase3=0;}
            // if ((v->HallData1==0)&&(v->HallData2==1))
            // {v->FlagStartPhase2=0; v->FlagStartPhase1=0;
            v->FlagStartPhase3=1;}
            // else if((v->HallData2==0)&&(v->HallData3==1))
            // {v->FlagStartPhase1=1; v->FlagStartPhase2=0;
            v->FlagStartPhase3=0;}
            // else if((v->HallData1==1)&&(v->HallData3==0))
            // {v->FlagStartPhase3=0; v->FlagStartPhase2=1;
            v->FlagStartPhase1=0;}

        }
    }
}

```

```

else if(spd_meas1.SpeedRpm<1250)
{
    if      ((v->HallData1==0)&&(v->HallData2==1))
        { v->FlagStartPhase1=0;                v->FlagStartPhase2=1;
v->FlagStartPhase3=0;}
        else if((v->HallData2==0)&&(v->HallData3==1))
            { v->FlagStartPhase1=1;                v->FlagStartPhase2=0;
v->FlagStartPhase3=0;}
        else if((v->HallData1==1)&&(v->HallData3==0))
            { v->FlagStartPhase1=0;                v->FlagStartPhase2=0;
v->FlagStartPhase3=1;}
    }
/*      else      //开通角为-1.875°
    {
        if      ((v->HallData1==0)&&(v->HallData6==1))
            { v->FlagStartPhase1=0;                v->FlagStartPhase2=0;
v->FlagStartPhase3=1;}
        else if((v->HallData5==1)&&(v->HallData1==0))
            { v->FlagStartPhase1=1;                v->FlagStartPhase2=0;
v->FlagStartPhase3=0;}
        else if((v->HallData4==1)&&(v->HallData3==0))
            { v->FlagStartPhase1=0;                v->FlagStartPhase2=1;
v->FlagStartPhase3=0;}
    }*/
}
else if(v->RunState==RVS_STATE)
{
    if(spd_meas1.SpeedRpm<SPD_BORDER)
    {
        v->HallData1=GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA13;
        v->HallData2=GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA12;
        v->HallData3=GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA11;
        v->HallData4=GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA14;
        v->HallData5=GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA15;
        v->HallData6=GioDatRegs.GPBDAT.bit.GPIOB14;

        if(spd_meas1.SpeedRpm<160)
        {
            //          if((v->HallData5==0)&&(v->HallData4==1)){ v->FlagStartPhase2=1;}
else { v->FlagStartPhase2=0;}
            //          if((v->HallData6==0)&&(v->HallData5==1)){ v->FlagStartPhase1=1;}
else { v->FlagStartPhase1=0;}
        }
    }
}

```

```

//          if((v->HallData4==0)&&(v->HallData6==1)){ v->FlagStartPhase3=1;}
else{ v->FlagStartPhase3=0;}
//          if((v->HallData1==1)&&(v->HallData4==1)){ v->FlagStartPhase2=1;}
else{ v->FlagStartPhase2=0;}
//          if((v->HallData2==1)&&(v->HallData5==1)){ v->FlagStartPhase1=1;}
else{ v->FlagStartPhase1=0;}
//          if((v->HallData3==1)&&(v->HallData6==1)){ v->FlagStartPhase3=1;}
else{ v->FlagStartPhase3=0;}
            if(v->HallData1==1){ v->FlagStartPhase2=1;} else{ v->FlagStartPhase2=0;}
            if(v->HallData3==1){ v->FlagStartPhase3=1;} else{ v->FlagStartPhase3=0;}
//          if((v->HallData1==1)&&(v->HallData5==0)){ v->FlagStartPhase2=1;}
else{ v->FlagStartPhase2=0;}
//          if((v->HallData2==1)&&(v->HallData6==0)){ v->FlagStartPhase1=1;}
else{ v->FlagStartPhase1=0;}//
//          if      ((v->HallData1==0)&&(v->HallData2==1))
//                                     { v->FlagStartPhase2=0;  v->FlagStartPhase1=0;
v->FlagStartPhase3=1;}
//          else if((v->HallData2==0)&&(v->HallData3==1))
//                                     { v->FlagStartPhase1=1;  v->FlagStartPhase2=0;
v->FlagStartPhase3=0;}
//          else if((v->HallData1==1)&&(v->HallData3==0))
//                                     { v->FlagStartPhase3=0;  v->FlagStartPhase2=1;
v->FlagStartPhase1=0;}

        }
    else if(spd_meas1.SpeedRpm<1250)
    {
        if      ((v->HallData1==1)&&(v->HallData2==0))
            { v->FlagStartPhase1=0;                                     v->FlagStartPhase2=1;
v->FlagStartPhase3=0;}
        else if((v->HallData2==1)&&(v->HallData3==0))
            { v->FlagStartPhase1=1;                                     v->FlagStartPhase2=0;
v->FlagStartPhase3=0;}
        else if((v->HallData1==0)&&(v->HallData3==1))
            { v->FlagStartPhase1=0;                                     v->FlagStartPhase2=0;
v->FlagStartPhase3=1;}
    }
/*    else      //开通角为-1.875°
    {
        if      ((v->HallData1==0)&&(v->HallData6==1))
            { v->FlagStartPhase1=0;                                     v->FlagStartPhase2=0;
v->FlagStartPhase3=1;}
        else if((v->HallData5==1)&&(v->HallData1==0))

```

```

        {v->FlagStartPhase1=1;                v->FlagStartPhase2=0;
v->FlagStartPhase3=0;}
        else if((v->HallData4==1)&&(v->HallData3==0))
        {v->FlagStartPhase1=0;                v->FlagStartPhase2=1;
v->FlagStartPhase3=0;}
        }*/
    }

}
else if(v->RunState==REG_STATE)
{

}
else if(v->RunState==STOP_STATE)
{
    v->FlagStartPhase1=0;
    v->FlagStartPhase2=0;
    v->FlagStartPhase3=0;

    v->FlagStc=0;
}

FLAG_CAP1=0;
FLAG_CAP2=0;
FLAG_CAP3=0;

}
/*=====
=====*/

void APC1_calc(APC1 *v)
{ extern Uint16 FLAG_CAP1,    FLAG_CAP2, FLAG_CAP3;
  extern SPEED_MEAS1_CAP spd_meas1;
  extern STC1 stc1;
  _iq TempSpd;

  v->FlagApc=1;
  stc1.FlagStc=0;

  TempSpd=spd_meas1.Speed*BASE_SPD;
  v->AngStep=TempSpd/(60000*ISR_FREQUENCY);
  v->AngStep=v->AngStep*360 ;
  v->AngStep=_IQdiv(v->AngStep,_IQ(BASE_ANG));

```

```

if(v->RunState==FWD_STATE)
{
    if(FLAG_CAP1)
    {
        v->AngPhase1 += v->AngStep;

        if (v->AngPhase1 < v->AngOn)
            { v->FlagRunPhase1=0; v->FlagStepCmutPhase1=1;}

        else if((v->AngPhase1>=v->AngOff)&&(v->AngPhase1<v->AngStepCmut))
            { v->FlagRunPhase1=0; v->FlagStepCmutPhase1=0;}
        else if(v->AngPhase1>=v->AngStepCmut)
            { v->FlagRunPhase1=0;    v->FlagStepCmutPhase1=1;    v->AngPhase1=0;
FLAG_CAP1=0;}
    }

    if(FLAG_CAP3)
    {
        v->AngPhase2 += v->AngStep;

        if (v->AngPhase2 < v->AngOn)
            { v->FlagRunPhase2=0; v->FlagStepCmutPhase2=1;}
        else if((v->AngPhase2>=v->AngOn)&&(v->AngPhase2<v->AngOff))
            { v->FlagRunPhase2=1; v->FlagStepCmutPhase2=0;}
        else if((v->AngPhase2>=v->AngOff)&&(v->AngPhase2<v->AngStepCmut))
            { v->FlagRunPhase2=0; v->FlagStepCmutPhase2=0;}
        else if(v->AngPhase2>=v->AngStepCmut)
            { v->FlagRunPhase2=0;    v->FlagStepCmutPhase2=1;    v->AngPhase2=0;
FLAG_CAP3=0;}
    }

    if(FLAG_CAP2)
    {
        v->AngPhase3 += v->AngStep;

        if (v->AngPhase3 < v->AngOn)
            { v->FlagRunPhase3=0; v->FlagStepCmutPhase3=1;}
        else if((v->AngPhase3>=v->AngOn)&&(v->AngPhase3<v->AngOff))
            { v->FlagRunPhase3=1; v->FlagStepCmutPhase3=0;}
        else if((v->AngPhase3>=v->AngOff)&&(v->AngPhase3<v->AngStepCmut))
            { v->FlagRunPhase3=0; v->FlagStepCmutPhase3=0;}
        else if(v->AngPhase3>=v->AngStepCmut)
            { v->FlagRunPhase3=0;    v->FlagStepCmutPhase3=1;    v->AngPhase3=0;
FLAG_CAP2=0;}
    }

```

```

    }
}
else if(v->RunState==RVS_STATE)
{

    if(FLAG_CAP2)
    {
        v->AngPhase1 += v->AngStep;

        if (v->AngPhase1 < v->AngOn)
            { v->FlagRunPhase1=0; v->FlagStepCmutPhase1=0;}
        else if((v->AngPhase1>=v->AngOn)&&(v->AngPhase1<v->AngOff))
            { v->FlagRunPhase1=1; v->FlagStepCmutPhase1=0;}
        else if((v->AngPhase1>=v->AngOff)&&(v->AngPhase1<v->AngStepCmut))
            { v->FlagRunPhase1=0; v->FlagStepCmutPhase1=0;}
        else if(v->AngPhase1>=v->AngStepCmut)
            { v->FlagRunPhase1=0; v->FlagStepCmutPhase1=1; v->AngPhase1=0;
FLAG_CAP2=0;}
    }

    if(FLAG_CAP1)
    {
        v->AngPhase2 += v->AngStep;

        if (v->AngPhase2 < v->AngOn)
            { v->FlagRunPhase2=0; v->FlagStepCmutPhase2=0;}
        else if((v->AngPhase2>=v->AngOn)&&(v->AngPhase2<v->AngOff))
            { v->FlagRunPhase2=1; v->FlagStepCmutPhase2=0;}
        else if((v->AngPhase2>=v->AngOff)&&(v->AngPhase2<v->AngStepCmut))
            { v->FlagRunPhase2=0; v->FlagStepCmutPhase2=0;}
        else if(v->AngPhase2>=v->AngStepCmut)
            { v->FlagRunPhase2=0; v->FlagStepCmutPhase2=1; v->AngPhase2=0;
FLAG_CAP1=0;}
    }

    if(FLAG_CAP3)
    {
        v->AngPhase3 += v->AngStep;

        if (v->AngPhase3 < v->AngOn)
            { v->FlagRunPhase3=0; v->FlagStepCmutPhase3=0;}
        else if((v->AngPhase3>=v->AngOn)&&(v->AngPhase3<v->AngOff))
            { v->FlagRunPhase3=1; v->FlagStepCmutPhase3=0;}
        else if((v->AngPhase3>=v->AngOff)&&(v->AngPhase3<v->AngStepCmut))

```

```

        {v->FlagRunPhase3=0; v->FlagStepCmutPhase3=0;}
    else if(v->AngPhase3>=v->AngStepCmut)
        {v->FlagRunPhase3=0;    v->FlagStepCmutPhase3=1;    v->AngPhase3=0;
FLAG_CAP3=0;}
    }
}
else if(v->RunState==REG_STATE)
{

}
else if(v->RunState==STOP_STATE)
{
    v->FlagApc=0;
    v->FlagRunPhase1=0;
    v->FlagRunPhase2=0;
    v->FlagRunPhase3=0;
    v->FlagStepCmutPhase1=0;
    v->FlagStepCmutPhase2=0;
    v->FlagStepCmutPhase3=0;

}

}

/*=====
=====*/

void CCC1_calc(CCC1 *v)
{

    if    (v->FdbPhase1 > v->Imax){v->Da=_IQ(0.0);}
    else if(v->FdbPhase1 > v->Ref ){v->Da=_IQ(0.0);}
    else    {v->Da=_IQ(1);}

    if    (v->FdbPhase3 > v->Imax){v->Dc=_IQ(0.0);}
    else if(v->FdbPhase3 > v->Ref ){v->Dc=_IQ(0.0);}
    else    {v->Dc=_IQ(1);}

}
/*=====
=====*/

void PWMGEN1_calc(PWMGEN1 *v)
{
    if((v->FlagStc==1)&&(v->FlagApc==0))

```

```

{
    if(v->FlagStartPhase1==1)
    {
        EvaCtrRegs.CMPR1 = (Uint16)(((_IQ(1)- v->Da)*PERD_TMR1)>>15);
        GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA1 = ACTIVE;
    }
    else
    {
        EvaCtrRegs.CMPR1 = 0xFFFF;
        GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA1 = INACTIVE;
    }
    if(v->FlagStartPhase2==1)
    {
        EvaCtrRegs.CMPR2 = (Uint16)(((_IQ(1)-v->Db)*PERD_TMR1)>>15);
        GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA3 = ACTIVE;
    }
    else
    {
        EvaCtrRegs.CMPR2 = 0xFFFF;
        GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA3 = INACTIVE;
    }
    if(v->FlagStartPhase3==1)
    {
        EvaCtrRegs.CMPR3 = (Uint16)(((_IQ(1)-v->Dc)*PERD_TMR1)>>15);
        GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA5 = ACTIVE;
    }
    else
    {
        EvaCtrRegs.CMPR3 = 0xFFFF;
        GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA5 = INACTIVE;
    }
}

else if((v->FlagStc==0)&&(v->FlagApc==1))
{
    if(v->FlagRunPhase1==1)
    {
        EvaCtrRegs.CMPR1 = (Uint16)(((_IQ(1)-v->Da)*PERD_TMR1)>>15);
        GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA1 = ACTIVE;
    }
    else
    {
        EvaCtrRegs.CMPR1 = 0xFFFF;
    }
}

```

```

        if(v->FlagStepCmutPhase1==0){ GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA1
ACTIVE ;}
        else{ GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA1 = INACTIVE ;}
    }

    if(v->FlagRunPhase2==1)
    {
        EvaCtrRegs.CMPR2 = (Uint16)(((_IQ(1)-v->Db)*PERD_TMR1)>>15) ;
        GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA3 = ACTIVE ;
    }
    else
    {
        EvaCtrRegs.CMPR2 = 0xFFFF ;
        if(v->FlagStepCmutPhase2==0){ GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA3
ACTIVE ;}
        else{ GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA3 = INACTIVE ;}
    }

    if(v->FlagRunPhase3==1)
    {
        EvaCtrRegs.CMPR3 = (Uint16)(((_IQ(1)-v->Dc)*PERD_TMR1)>>15) ; //Q15
to Q0 ;;
        GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA5 = ACTIVE ;
    }
    else
    {
        EvaCtrRegs.CMPR3 = 0xFFFF ;
        if(v->FlagStepCmutPhase3==0){ GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA5
ACTIVE ;}
        else{ GioDatRegs.GPADAT.bit.GPIOA5 = INACTIVE ;}
    }

}
}
/*=====
=====*/

void Ileg3_dcbus_read1(ILEG3DCBUSMEAS1 *p)
{
    _iq DigitValue=0, AnalogValue=0;
//    while (AdcCtrRegs.ADCST.bit.SEQ1_BSY == 1){};

    DigitValue=(Uint32)AdcCtrRegs.ADCRESULT0;

```

```

DigitValue=DigitValue<<11;
AnalogValue=DigitValue * 3 / 4095;
AnalogValue=_IQmpy((AnalogValue - p->ImeasAOffset), p->ImeasAGain);
p->RealImeasA=(Sint16)(AnalogValue>>15);
p->ImeasA=(p->OldImeasA + AnalogValue/BASE_CURRENT)/2;
p->OldImeasA = p->ImeasA;

DigitValue=(Uint32)AdcCtrRegs.ADCRESULT1;

AnalogValue=DigitValue * 3 / 4095;
AnalogValue=_IQmpy((AnalogValue - p->ImeasBOffset), p->ImeasBGain);
p->RealImeasB=(Sint16)(AnalogValue>>15);
p->ImeasB=(p->OldImeasB + AnalogValue/BASE_CURRENT)/2;
p->OldImeasB = p->ImeasB;

DigitValue=(Uint32)AdcCtrRegs.ADCRESULT2;
DigitValue=DigitValue<<11;
AnalogValue=DigitValue * 3 / 4095;
AnalogValue=_IQmpy((AnalogValue - p->ImeasCOffset), p->ImeasCGain);
p->RealImeasC=(Sint16)(AnalogValue>>15);
p->ImeasC=(p->OldImeasC + AnalogValue/BASE_CURRENT)/2;
p->OldImeasC = p->ImeasC;

DigitValue=(Uint32)AdcCtrRegs.ADCRESULT3;
DigitValue=DigitValue<<11;
AnalogValue=DigitValue * 3 / 4095;
AnalogValue=_IQmpy(AnalogValue , p->VdcMeasGain)+p->VdcMeasOffset ;
p->RealVdcMeas=(Uint16)(AnalogValue>>15);
p->VdcMeas=(p->OldVdcMeas + AnalogValue/BASE_VOLTAGE)/2;
p->OldVdcMeas = p->VdcMeas;

}

/*=====
=====*/

void Ileg3_correct1(ILEG3CORRECT1 *p)
{
    _iq Temp_AOffset=0, Temp_BOffset=0,Temp_COffset=0;
    Uint16 i;

    for(i=0;i<=9;i++)
    {
        ADC_START;
    }
}

```

```

        Delay_msec(1);

        Temp_AOffset=(Uint32)AdcCtrRegs.ADCRESULT0;
        Temp_AOffset=Temp_AOffset<<11;
        p->ImeasAOffset += Temp_AOffset;

        Temp_BOffset=(Uint32)AdcCtrRegs.ADCRESULT1;
        Temp_BOffset=Temp_BOffset<<11;
        p->ImeasBOffset += Temp_BOffset;

        Temp_COffset=(Uint32)AdcCtrRegs.ADCRESULT2;
        Temp_COffset=Temp_COffset<<11;
        p->ImeasCOffset += Temp_COffset;

    }

    p->ImeasAOffset = (p->ImeasAOffset)/10;
    p->ImeasAOffset=p->ImeasAOffset * 3 / 4095;
    p->ImeasBOffset = (p->ImeasBOffset)/10;
    p->ImeasBOffset=p->ImeasBOffset * 3 / 4095;
    p->ImeasCOffset = (p->ImeasCOffset)/10;
    p->ImeasCOffset=p->ImeasCOffset * 3 / 4095;
}
/*=====
=====*/

void speed_meas1_cap_calc(SPEED_MEAS1_CAP *v)
{
    Uint32 DeltCount=0,Speed_tmp=0;

    v->OldCount = v->NewCount;
    v->NewCount = v->SpeedMeasCount;
    DeltCount = v->NewCount - v->OldCount;
    Speed_tmp = ((Uint32)20000*ISR_FREQUENCY) / (DeltCount*SRM_ROTORS);

    if(abs(Speed_tmp - v->SpeedRpm)<200)
        {v->SpeedRpm = (v->SpeedRpm + Speed_tmp)/2;}

    v->Speed = _IQ(v->SpeedRpm) / BASE_SPD ;
}
/*=====
=====*/

void pid_reg1_calc(PIDREG1 *v)

```

```

{
    v->Err = v->Ref - v->Fdb;
    v->ILoopCount++;
    if(v->ILoopCount >= v->IPrescale)
    {
        v->Ui = v->Ui + _IQmpy(v->Ki, v->Err);
        if(v->Ui < v->UiMin){v->Ui = v->UiMin;}
        if(v->Ui > v->UiMax){v->Ui = v->UiMax;}

        v->ILoopCount=0;
    }
    v->Up = _IQmpy(v->Kp,v->Err);
    v->Out = v->Up + v->Ui;
    if (v->Out > v->OutMax){ v->Out = v->OutMax;}
    else if (v->Out < v->OutMin){ v->Out = v->OutMin;}

}

/*=====
=====*/

void ADC_read(ADC *p)
{
    p->Ref=(Uint32)AdcCtrRegs.ADCRESULT7;
    p->Ref=p->Ref<<11;
    p->Ref=p->Ref/4095;

    p->AngOff=(Uint32)AdcCtrRegs.ADCRESULT9;
    p->AngOff=p->AngOff<<11;
    p->AngOff=p->AngOff/4095;

}

/*=====
=====*/

```

致谢

三年的研究生生活使我学到了很多，我的成长离不开大家的帮助，首先向我的硕士研究生导师徐衍亮教授表示衷心的感谢。徐老师渊博的理论知识，严谨的治学态度，务实的工作作风，和蔼的为人处事，给我的研究生生涯留下了深深的烙印。从论文开题、理论研究到论文撰写，每一步都离不开徐老师精心的指导，在整个课题研究过程中，徐老师对我耐心指导使我如期完成我的论文。

其次衷心感谢电机研究所的所有老师们对我热心的指导与无私的帮助，同时感谢实验室师兄弟在生活和学习方面的帮助，感谢博士研究生宫晓和硕士研究生张伟、石强在电机有限元分析和电机理论方面的帮助，感谢博士研究生付东山、硕士研究生李元东、宋双翼、黎昊在机械安装和实验测试方面的无私奉献，感谢硕士研究生宋慧慧、史方芳在论文撰写方面的帮助，感谢电机与电器研究所 12 级全体研究生同学，有了你们才使得研究生的生活更加精彩。

最后衷心感谢我的家人，感谢你们对我的关心、支持和鼓励！

学位论文评阅及答辩情况表

论文评阅人	姓 名		专业技术 职 务	是否博导 (硕导)	所 在 单 位		总体评价 ※
答辩委员会成员	姓 名		专业技术 职 务	是否博导 (硕导)	所 在 单 位		
	主席						
	委 员						
答辩委员会对论文的 总体评价※			答辩秘书		答辩日期		
备注							

※优秀为“A”；良好为“B”；合格为“C”；不合格为“D”。