

文本复制检测报告单(全文标明引文)

№:ADBD2021R_2021072315351220210723154734311182943003

检测时间:2021-07-23 15:47:34

检测文献: 008

作者: Supervisor;Enterprise

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

图书资源

优先出版文献库

学术论文联合比对库

互联网资源(包含贴吧等论坛资源)

英文数据库(涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

互联网文档资源

源代码库

CNKI大成编客-原创作品库

个人比对库

时间范围: 1900-01-01至2021-07-23

检测结果

去除本人文献复制比: 20.8%

跨语言检测结果: 0%

去除引用文献复制比: 20.8%

总文字复制比: 20.8%

单篇最大文字复制比: 13% (SFC装置在燃机启动过程中的Simulink可视化仿真)

重复字数: [7499]

总段落数: [4]

总字数: [36039]

疑似段落数: [4]

单篇最大重复字数: [4680]

前部重合字数: [852]

疑似段落最大重合字数: [2574]

后部重合字数: [6647]

疑似段落最小重合字数: [981]



指 标: ☐ 疑似剽窃观点 ☒ 疑似剽窃文字表述 ☐ 疑似整体剽窃 ☐ 过度引用

表 格: 0

公 式: 没有公式

疑似文字的图片: 0

脚注与尾注: 0

9.7% (981) 9.7% (981) 008_第1部分 (总10139字)

16.8% (1483) 16.8% (1483) 008_第2部分 (总8828字)

26% (2461) 26% (2461) 008_第3部分 (总9460字)

33.8% (2574) 33.8% (2574) 008_第4部分 (总7612字)



(注释: 无问题部分 文字复制部分 引用部分)

1. 008_第1部分

总字数: 10139

相似文献列表

去除本人文献复制比: 9.7% (981)

文字复制比: 9.7% (981)

疑似剽窃观点: (0)

1	考虑燃气轮机变频启动的发电机保护系统研究 林伟(导师: 丁巧林;冯国柱) - 《华北电力大学硕士论文》- 2014-06-01	8.3% (846) 是否引证: 否
2	硕动力134班苑国庆 - 《学术论文联合比对库》- 2015-12-22	1.3% (129) 是否引证: 否
3	燃气-蒸汽联合循环机组运行参数的优化研究 苑国庆(导师: 王惠杰) - 《华北电力大学硕士论文》- 2016-03-01	1.3% (129) 是否引证: 否

专业硕士学位论文

燃气轮机发电厂变频控制研究

Research on Frequency Conversion Control of Gas

Turbine Power Plant

2021 年 06 月

国内图书分类号： 学校代码：10079

国际图书分类号： 密级：公开

专业硕士学位论文燃气轮机发电厂变频控制研究

硕士研究生：

导师：

企业导师：

申请学位： 工程硕士

专业领域： 电气工程培养方式： 在职

所在学院： 电气与工程学院

答辩日期： 2021 年 08 月

授予学位单位： 华北电力大学

Classified Index:

U.D.C:

Dissertation for the Professional master's Degree

Research on Frequency Conversion Control of Gas

Turbine Power Plant

Candidate:

Supervisor:

Enterprise mentor:

Academic Degree Applied for: Master of Electrical Engineering

Speciality: Electrical Engineering

Cultivation ways: On-job

School:

School of Electrical and Electronic

Engineering

Date of Defence: August, 2021

Degree-Confering-Institution: North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《燃气轮机发电厂变频控制研究》，

是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名： 日期： 年月日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《燃气轮机发电厂变频控制研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提

供文献传递服务和交换服务。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或其

他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）：

保密□，在年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名： 日期： 年月日

导师签名： 日期： 年月日

摘要

将燃机从静止状态或盘车状态改变至达到给定转速的过程称为启动燃机。

通过发电机与电动机的角色转换，提供燃机启动初期的动力源。一组作为起动装置的变频（SFC）设备，使得交流电注入频率控制的发电机，驱动同步电动机（可控制的频率，可控制的转速）转动，以此启动燃机。SFC 的频率转换为注入发电机定子的交流电提供可控制的频率，这会在启动期间以预定速率加速发电机的上升。在启动过程中，由励磁电流产生的磁场会在发电机转子上施加一定的励磁电流，励磁磁场与 SFC 磁场相互作用，而 SFC 会确定励磁场的运行情况。本文的主要研究内容为：

首先对燃气轮机发电厂变频控制研究的背景和意义进行说明，并结合此课题

的国内外研究现状进行分析和对整个论文的研究内容进行简要介绍。然后，我们研究了在变频启动的几个重要阶段中，诸如定子电压，定子电流和转子速度等参数随时间变化的规律性，接着对当前技术水平情况下能够采取的变频改造技术的基本原

理和控制方式进行分析。在对变频器进行改造时，要考虑到变频器的实际工作条件以及变频器特定因素的影响，对变频器的工作原理和性能进行了分析。

接下来，我们描述 SFC 如何通过旋转燃气轮机以完成启动过程来使燃气轮机的同步发电机在启动期间用作同步电动机，同时详细介绍了静止变频器的设备组成和主要设备（三相全控整流桥、三相全控 PWM 型逆变桥）的工作原理。最后，

结合 SFC 装置的日常启动曲线，对整流前后，逆变前后的电压形式进行了仿真和谐波分析，以便对 SFC 装置进行可视化仿真。在燃机装置的启动过程中，并模拟最终获得了可变幅度的变频交流电。研究了 SFC 在日常运行中对燃机发电厂的其它电气设备可能产生的谐波危害及相应抑制手段。

关键词：变频控制；静止变频器；燃气轮机；仿真分析

II

ABSTRACT

The process of changing the gas turbine from a stationary state or cranking state to reaching a given speed is called starting the internal combustion engine. Through the role conversion of generator and motor, the power source of gas turbine at the initial stage of start-up is provided. A set of frequency conversion (SFC) equipment as starting device makes alternating current injected into frequency controlled generator to drive synchronous motor (controllable frequency, controllable speed) to start gas turbine. The frequency conversion of the SFC provides a controllable frequency for the alternating current injected into the generator stator, which accelerates the rise of the generator at a predetermined rate during start-up. During the start-up process, the magnetic field generated by the excitation current will exert a certain excitation current on the generator rotor. The excitation magnetic field interacts with the SFC magnetic field, and the SFC will determine the operation of the excitation magnetic field. The main research content of this article is:

First, the background and significance of the research on frequency conversion control in gas turbine power plants are explained, combined with the current research status of this topic at home and abroad, and the research content of the whole thesis is briefly introduced. Then, we studied the regularity of changes in parameters such as stator voltage, stator current, and rotor speed over time in several important stages of variable frequency startup, and then discussed the basic principles and basic principles of variable frequency transformation technology that can be adopted under the current technical level. The control method is analyzed. When transforming the inverter, it is necessary to consider the actual working conditions of the inverter and the influence of specific factors of the inverter, and analyze the working principle and performance of the inverter. Next, we describe how the stationary converter (SFC) rotates the gas turbine to complete the startup process so that the synchronous generator of the gas turbine can be used as a synchronous motor during startup. At the same time, we introduce in detail the equipment composition and main equipment of the stationary frequency converter (3 The working principle of three-phase fully-controlled rectifier bridge and three-phase fully-controlled PWM inverter bridge. Finally, combined with the daily start-up curve of the SFC device, simulation and harmonic analysis of the voltage forms before and after rectification, before and after the inverter, are carried out to visually simulate the SFC device. During the start-up process of the combustion device, a variable-amplitude variable frequency alternating current was finally obtained

III

by simulation. The harmonic hazards that SFC may produce to other electrical equipment of gas turbine power plants in daily operation and the corresponding suppression methods are studied.

Keywords: frequency conversion control; static frequency converter; gas turbine; simulation analysis

IV

目录

摘要

..... I

..... I

ABSTRACT

... II

第 1 章绪论

... 1

1.1 研究的背景及意义

1.2 国内外研究现状	1
1.3 本文研究内容说明	2
第 2 章燃气轮机变频器及控制说明	6
2.1 燃气轮机变频启动过程及特点	7
2.1.1 变频启动过程	7
2.1.2 变频启动特点	8
2.2 变频器应用的作用与意义	8
2.3 变频调速节能的原理	9
2.4 变频器控制方式说明	11
2.4.1 正弦脉宽调制控制方式	11
2.4.2 电压空间矢量控制方式	11
2.4.3 矢量控制方式	12
2.4.4 直接转矩控制方式	12
2.4.5 矩阵式交-交控制方式	12
2.5 本章小结	9
第 3 章变频器在燃气轮机应用中的难点及解决方法	13
3.1 低压变频启动与运行力矩低的问题	13
3.1.1 产生的原因	13
3.1.2 影响变频输出力矩过低的原因	14
3.1.3 改造的优先级	14
3.2 变频一次系统失电再启动问题	14
3.2.1 变频器一次电源失电再启动过程中的动作机理	14
3.2.2 变频器一次电源失电再启动功能存在的问题及改善方法	15
3.3 变频器控制电源问题	15
3.3.1 稳定变频器控制电源的重要性	16
3.3.2 可靠的控制电源具体要求	16
3.4 本章小结	16
第 4 章静止变频器的设备及工作原理	17
4.1 同步电机的变频调速原理	17
4.2 静止变频器的功用与设备组成	17
4.2.1 静止变频器的作用	17
4.2.2 静止变频器的设备组成与相关工作原理	18
4.3 本章小结	24
第 5 章静止变频器在燃气轮机启动过程中仿真及谐波分析	25
5.1 三相十二脉冲全控整流电路分析	25
5.2 SFC 装置在燃机启动过程中的可视化仿真	27
5.2 SFC 内部整流电路与逆变电路谐波分析	29
5.2.1 三相十二脉冲全控整流电路的谐波分析	29
5.2.3 三相桥式 PWM 型逆变电路的谐波分析	35
5.3 SFC 在燃机启动过程中的谐波分析	37
5.3.1 SFC 装置注入发电机定子电压的仿真谐波分析	37
5.3.2 SFC 装置在燃机启动过程中谐波危害的控制	38
5.4 本章小结	39
第 6 章总结与展望	40
6.1 论文总结	40

第 1 章绪论

1.1 研究的背景及意义节能环保的概念越来越得到国家的重视，首都北京作为全国的政治文化中心也是早早的就对四个大型燃气火力发电站进行升级和建造。四大燃气发电厂是实施首都能源战略调整，能源结构优化，能源基础设施改善，环境空气质量改善和改善公民生活质量的重要措施。它们是构建清洁、高效和安全的低碳能源系统的重要组成部分和驱动力。低碳环保、节能降耗、碳中和等等这些概念逐渐成为电厂发展的热点问题。以往的燃煤电厂通常采用调阀来调节介质的流量，这种现象存在很大的节流损耗，造成了能源的大量浪费。另外，控制阀容易受到诸如长期通过介质的影响而引起的调节异常、堵塞和老化问题之类的问题，以及诸如因启动电流而引起的冲击之类的缺陷。这对系统设备的运行稳定性和效率产生重大的负面影响。目前，在国家正在大力鼓励采取节能措施，并强烈建议采用变频调速技术。从发展前景的角度来看，变频器具有广阔的应用市场，特别是对于高压变频器和大功率变频器。变频调速可以显著提高电机控制水平，确保电机始终在节能状态下运行。由此可见，研究变频技术的节能应用具有非常重要的现实意义。

发电工业的舞台在 1939 年迎来了世界上第一台商用燃气轮机。在电气系统中，燃气轮机仍然仅起到调节负载和紧急启动能源的作用，因为电厂的单个容量和热效率均不足以满足更大的电力需求。燃气轮机的特点是“自供电，快速启动”，

可以有效地确保电网安全运行并快速恢复供电。多年来一直从事发电的西方发达国家得出的结论是，从调峰和安全性的角度来看，燃气轮机发电机组应占电网总功率的 8-12%。

1970 年后，燃机的容量与效率有着很大的提高，随着全球天然气资源的发

展而发展的燃气轮机，其技术上逐渐成熟。联合循环蒸汽发电厂于世界中扮演着越来越重要的角色。不仅可以调整电力负荷和紧急削波也可以向电网提供稳定且可持续的有功功率。在建设成本，使用效率，环保指标，投资和日常维修的质量与价格比方面，天然气或液体燃料的发电优势大于装有脱硫装置的燃煤机组。因此，前者在全球电力生产能力中的份额已大大提高。

压气机，燃烧室和涡轮机的三个主要部件共同构成了燃气轮机。压气机压缩气压的过程包括将机械功引入压缩机中，使其旋转，然后通过空气流的能量将进入压缩机的机械能传递到空气中，将空气从压缩机入口处的压力传递到空气中，

从而使压缩机出口处的压力升高。压缩机出口的空气进入燃烧室后，高压空气与燃料一起燃烧，从而在一定压力和温度下产生气体。气体进入燃气轮机膨胀并做 2

功使其旋转，并发出机械功以拖曳负载。气体膨胀过程在涡轮机出口处结束，并且气体膨胀至涡轮机出口背压。在燃气轮机正常运行期间，压缩机由燃气轮机驱动，通常，其中三分之二的功率用于驱动压缩机，而其余的三分之一用作拖曳式压缩机的输出功率加载。其中存在一个问题：在启动阶段，当涡轮的功率在点火之前为零时，以及在点火之后的周期，当涡轮的功率小于操作压缩机时，需要燃气轮机的主机电力设备以外的其他电气设备来弥补所需的功率。换句话说，必须使用外部动力设备来启动燃气轮机。接通电源后，将再次移除外部电源供给。

此时将启动燃气轮机的外部电源供给设备及其附件统称为启动系统。

9F 燃气轮机的启动是通过将发电机用作交流同步电动机并使用固定变频器

(SFC) 作为启动装置来完成的，该装置将可变频率的交流电注入到发电机的定子中，成为变频的电动机作为外部动力装置驱动燃机启动。注入发电机定子的交流电源通过 SFC 变频器，这有助于以预定速率加速启动过程。在启动过程中，

与该单元关联的励磁装置将励磁电流施加到发电机转子上。励磁电流产生的磁场与启动变频器产生的磁场共同作用，SFC 确定励磁设备的运行，因此对燃气轮机发电厂进行变频控制研究具有十分重要的意义。

1.2 国内外研究现状F 级燃气发电机组是市场上技术含量高，技术先进的燃气-蒸汽联合循环发电机组，具有相对独特的启动过程：

(1) 在启动开始时，同步发电机以电动机模式运行，固定变频装置 (SFC) 向定子绕组提供电压，而固定励磁装置 (SEE, Static Excitation Equipment) 向转子绕组提供励磁电流。

(2) 当两台发动机均达到额定转速的 70% 时，发电机与励磁装置断开连接，不再以电动机模式运行，同时燃烧气体点火加速，并且拖曳发电机以进一步提高转速。

(3) 当加速到其标称速度时，SFC 再次将励磁电流提供给发电机转子，该发电机转子通常会发电并连接到电网。

SFC 最开始开始运行的时候用的的脉冲相换法：整流器的逆变导致主回路电流被直接切断，进而使得晶闸管在逆变桥之中全部被关闭切断；然后其再以减小整流器致使延迟角的方式方法转入整流器，达到脉冲能够被送到有要被触发逆变器需求的晶闸管中。如果这时发动机的速度被增加到 10% 的固定转速 n_N 的时候，

SFC 就会被转到反电势的自然换相这一阶段，一般情况下大都将其叫做负载换相模式 (LCI)；但是因为换相重叠角的时候，其中 3 个晶闸管全部同一时间被疏导通畅，以至于其中有 2 个已经导通了的晶闸管与某个两相电机绕组阶段发生了电 3

流短路的现象，最后使得本来就只导通的一个晶闸管由于反向偏压的状况被直接关闭断开，从而逆变器晶闸管的换相由此得到了实际产生。当机器性能水准较高的时候，一般情况下都是采用磁场定向矢量进行有效控制，并且采用转速电流双闭环的方式，经过速度以及磁通闭环调节器得到各自的定子电流量之中的励磁分量以及转矩分量，通过极坐标的变化以及转换，从而得到了定子电流量的幅值以及其负载角，定子电流里的幅值是电流环里的给定值数，通过对晶闸管整流电路的控制手段以达到控制定子电流之中闭环作用及效益，其中同步旋转的的坐标系所处的位置与负载角的所处位置两者重叠在一个地方，由此达到对逆变侧晶闸管的触发脉冲分配的作用力。

假如不使用 SFC 完成对发电机进行启动，F 级的燃气轮机的发电机容量很大，光发电机的启动电流就要超过 10000A，可能会导致发动机的安全性收到不良影响，若采用变频启动则启动电流仅仅只有大约 1500A。燃气-蒸汽相结合的循环发电机组组合的 SFC 包括了交-直、直-交整流桥以及电抗器与变频启动变压器，直流电抗器、控制器柜（其作用与向逆变器以及整流器供

给脉冲；还有 SFC

整个系统的实时控制、检测、保护；在启动程序时对励磁系统所输出的电流进行有效控制)。其中的 SEE 包括了数字式自动电压调节器(DAVR)、励磁变压器以及可控制硅整流桥与灭磁开关，这两组装备设置相互之间配合工作：

(1)在发电机采用同步电动机的程序模式运转的时候，厂用电母线为 SEE 之中的励磁变电压器供给了一次侧电压电流，降压之后变压器第二次侧可以作为可控制硅整流桥供给的正极电压，整流桥之中输出的直流电压电流通过逆变桥后向发动机的定子绕组注入频率可变的交流电流，由此产生出了一个与转子磁场相比较更加先进的定子旋转磁场，以此来拖动转子的旋转。

(2)采用发动机的模式程序进行运转的时候，SEE 利用了 DAVR 完成了对发电机可调节励磁的供给需求，这就可以使得发电机正常运转并且进入电网。

通常说的将燃气-蒸汽相联合循环机器组合的热电联产详细介绍为在汽机一

侧增加设置抽汽口，以合适的数量及时机选取一定数量低品位的蒸汽形成对于供热的循环方式方法，对燃气-蒸汽相联合的循环机组采取热电联合生产之后，机组的整体效率会得到非常大的提升，首当其冲的就是其中的热效率，其已经达到了 80% 的高度。此项技术的出现不仅仅可以使得冬天北方居民越来越集中的取暖弊端得到有效的缓解，也会使得北方环境污染问题得到极大程度的改善。赵东雯[

1]针对京津唐电网之中的一整套助力联合循环机组，经过在调峰需求效率以及

启动停止机器运转时间方面技术突出点的对比，并且通过对其在环境保护这一方面的长处，对此类传统典型性机组在调峰部分的改造可行性程度方面进行了研究讨论。王永志[

2]在针对京能集团太阳宫燃气-蒸汽互相联合的循环电站于“一拖一”

的运营方式模块之下，还在汽机抽汽程序还未有流量表、缺失非设计情况之下抽 4

汽供热的运行经验以及电网调峰参与的状况之下，经由对燃气-蒸汽相联合循环机组的特点性征详细分析与现场实际运行数据数值的规范整理、优化最终得到了冬季“一拖一”的运行模式之下汽机的供热量以及机组的调峰强度，为非设计工况条件的汽机抽汽供热、参与调峰方面都做了一定程度的探索。葛海华[

3]经过对存

在烟气挡板的联合性循环机组的一系列对比，由此对联合循环机组在调峰这一程序时会发生的部分问题展开了分析了解。经过现场运行的数据数值的采集收纳，

从而对可操作的调峰提出了原则性要求，可以为现实意义上参与了调峰机组提供指导性建议。王树国[

4]采用了 GE 公司的 SI09FA 型号的不补燃余热锅炉型三压

再热型循环机组作为主要研究的对象，经过对于燃烧循环做功反面的一系列了解

分析，从而构建了 RCG 理论概念模型。并且将这个作为基础，然后再通过MATLAB 的建立优化其程序条件，从其中得到了最优化的排气温度相对应的运行参照数据。

相对于燃机电厂的运营研究方面囊括了辅助机组系统的研究探索，范伟强[14]

对于某一类型的 SI09FA 燃气-蒸汽相联合的循环电厂的水循环体系的运转以及构成方式方法进行了详细全面的分析了解，经过其理论概念性的分析以及实验，

提出了可以在不使得原本的循环水管道改变的前提条件之下，使用了辅助停机系统冷却了水泵从而替代了循环水体系供给作为冷却水作为启动准备的可行性程度，还可以得到节约能源以及降低耗用的好处。林晓亮[

15]对机组启动的过程当

中汽轮机热反应力的形成条件做出来详细的研究探索，然后在一系列方面对于汽轮机热应力方面有效应的控制方式进行了多层次的解释与叙述，比如汽轮机的进气方式、减温水操作以及配合与温度的匹配三方面叙述。对于 D10 型号的汽轮机而言在初始启动的程序中各个部位的零件的应力全部都要经过其中一个拉-压的经历，在这之中工作条件最为恶劣的就是转子，其不仅仅要被热应力影响还要承受离心力方面的作用力。对于 SI09FA 机组的特征而言，大可以经过外部条件来手动对燃机温度的匹配值进行修改与采用手动调节方式对减温水的数量进行调节以达到足以维持汽轮机应力的正常合理区域之内。从而使得机组自身的升负荷率不会受到汽轮机应力方面的一系列限制，由此可以保证机组整个体系顺利进行

启动，也可以使得启动的时长大大减少。

GE 公司主打出产的燃气机早些时候在国内应用的范围比较多，文献[16, 17, 18]

之中对于该公司单轴联合循环机组的构造程序以及启动的特点进行了详细且全面的介绍叙述，其中着重分析介绍的特点：气缸壁非常的薄，工作时压力低；总膨胀比例小，级数少；工作时温度较高，动态与静态叶片都是采用了其特殊的冷却工艺手段；经过 IGV 以及燃气机温度控制 FSR 的逻辑从而控制机组的排气温度高低得到连续不断的稳定性价值；该公司还将经过了 H 级别的燃气机成功验证过的专有技术转移植入到了 F 级机组上面，从这些方面达到透平前温的提升 5

以及压气机压比的提升。D. EBrandt[

19]研究分析了该燃机构造的设计特征，也对

该公司 9F 燃机启动的过程当中所会发生的燃烧振荡所产生出的机理与预备防范举动进行了关键性的表述，其中气流于燃烧室之内激起来的流场存在非常强大的振动幅度以及有规律性的振荡，当其快要进入混燃燃烧程序的时候燃烧到达了可以燃烧的限定额度时，其自身带来的热量快速释放出并且进行快速的振荡，然而燃烧时产生的振荡而引导发生的压力振荡就会对机组的启动过程带来不可忽视的干扰，会造成一系列连带反应，比如机组启动时燃烧不稳定甚至导致熄火。另外，

文献[

20、21]里面也有对启动步骤当中，联合循环余热锅炉相关的关键控制点进行

了介绍，还涉及到启动步骤当中，三压再热无补燃锅炉对应的匹配参数环节需要控制的点，在实施点火操作之前，需要使得汽包水位处于一个较低水平的水位，

而在并汽之前则需要维持一个较高水平的水位，在开启余热锅炉的起始阶段，需要将省煤器在烟温比较低的情况下加进去实施再循环，避免排烟过程出现低温腐蚀现象。相关文献当中描述了燃气轮机叶片相关的耐高温性质在燃气轮机叶片技术优化后带来的发展，该技术是参考航空发动机相关叶片技术实施的优化，在此基础上能够使得燃气初温获得进一步的提升，也对提升效率的策略进行了研究。同时，文献还全方位的介绍现阶段燃气轮机相关技术的发展特征，解释了通过将燃机叶片增加保护

涂层，以及选择全新的金属材料进行制造能够使得其耐受的燃气初温更高，从而让循环过程变得更加高效。

对于燃气-蒸汽联合循环机组的研究是不断发展的，因而在确定并建立自己的分析方法前，需要对现有的经典方法进行分析与学习，综合考虑各种方法的优缺点，提出更适合的分析方法。研究人员常用级叠加法、以及基元叶栅法来实施多级轴流式相关压气机的整个模型构建过程[22]，在此基础上能够得到和压气机相关的通用线性曲线。W.H.Robbins 深入研究分析了基元叶栅法，基于一维稳定流动相关模型，通过能量守恒以及连续性相关方程，最终获得了每一级对应的性能相关参数，过程中级对应的特征参数选择的是平均流线位置的相关参数，并且还将进出口参数带入其中[23]。n M.S. Johnso 对轴流式相关的压气机模型实施了构建，过程中使用的方法是基元叶栅法，从而能够预估燃气轮机在非设计工作条件下的实际性能，像这一类可以用于各个领域的模型构建流程，可以适用于任何轴流式压气机[24]。南京航空航天大学的赵勇等人也构建了相关的模型，过程中选取的方法是基元叶栅法，该模型能够实现多级轴流式压气机在非设计工作状态下具备的性能的相关计算，同时还涉及到径向畸变的相关影响探索，对轴流式压气机在进气出现轴向畸变的情况下性能的改变实施了研究[25]。

通过变频调速相关方案的作用，电厂当中大功率的辅机能够完成更大程度的能源节约，由此带来的经济效益是非常大的。我国重点推荐技术当中就包含了电机调速相关改造这一项。对功率较大的设备实施变频调速能够完成电厂当中许多6的目标，包括了减少排放、能源节约以及能耗的降低等等。就高压变频器进行分析，其普遍的使用在冶金以及电力相关行业，能够产生明显的能源节约效果，形成的效益也是显著的。根据现场改造的众多案例实施改造之前以及之后的情况比较，结果表明：就节电率来说，变频改造能够实现不低于30%的平均值。

1.3 本文研究内容说明

第一章首先对燃气轮机发电厂变频控制探索的价值以及背景实施描述，同时根据该篇文章的研究内容结合世界各国的当前研究状态展开探索，在此基础上概述了该篇文章探索的重点内容。

第二章对变频启动过程中的关键环节实施了探索，重点在于随着时间的改变，其中发电机相关的转子转速、定子电压以及电流的变化趋势，接着对当前技术水平情况下能够采取的变频改造技术的基本原理和控制方式进行分析。

指 标		
疑似剽窃文字表述		
<div>1. 研究了在变频启动的几个重要阶段中，诸如定子电压，定子电流和转子速度等参数随时间变化的规律性，</div> <div>2. 一般情况下都是采用磁场定向矢量进行有效控制，并且采用转速电流双闭环的方式，经过速度以及磁通闭环调节器得到各自的定子电流量之中的励磁分量以及转矩分量，</div> <div>3. 得到了定子电流量的幅值以及其负载角，定子电流里的幅值是电流环里的给定值数，通过对晶闸管整流电路的控制手段以达到控制定子电流</div> <div>4. 逆变侧晶闸管的触发脉冲分配的作用力。</div> <div>假如不使用 SFC 完成对发电机进行启动，F</div> <div>5. 燃气-蒸汽相结合的循环发电机器组合的 SFC 包括了交-直、直-交整流桥以及电抗器与变频启动变压器，直流电抗器、控制器柜（其作用与向逆变器以及整流器供给脉冲；还有 SFC</div> <div>整个系统的实时控制、检测、保护；在启动</div> <div>6. 研究是不断发展的，因而在确定并建立自己的分析方法前，需要对现有的经典方法进行分析与学习，综合考虑各种方法</div>		
2. 008_第2部分		总字数：8828
相似文献列表		
去除本人文献复制比：16.8%(1483)文字复制比：16.8%(1483)疑似剽窃观点：(0)		
1	变频系统在燃气轮机发电厂中的应用及探索 王健(导师：胡立生;袁群华) - 《上海交通大学硕士论文》 - 2015-10-01	14.9% (1314) 是否引证：否
2	03200_1110322042_王健 王健 - 《学术论文联合比对库》 - 2015-12-21	14.4% (1272) 是否引证：否
3	变频系统在燃气轮机发电厂中的应用及探索 - 《学术论文联合比对库》 - 2015-10-23	5.9% (522) 是否引证：否
4	企业集团内部资本市场异化对公司治理的影响 吴成颂; - 《经济管理》 - 2011-05-15	0.3% (29) 是否引证：否
原文内容		

第三章指出在对变频器进行改造过程中，结合实际运行情况和变频器自身因

素的影响，分析了变频器的工作原理和性能。

第四章介绍了静止变频器（SFC）装置如何使燃气轮机的同步发电机在启动

过程中能够作为同步电动机使用，拖动燃气轮机转动来完成燃气轮机组的启动过程，同时详细介绍了静止变频器的设备组成和主要设备（三相全控整流桥、三相全控 PWM 型逆变桥）的工作原理。

第五章在结合 SFC 设备的整个工作过程中，相关曲线就逆变以及整流操作

前后形成的各种电压波形展开谐波研究以及仿真模拟，从而真正做到了燃机启动环节当中，SFC 相关设备的Simulink可视化仿真过程，最后能够得到仿真的交变电流，并且是频率和幅值都可变的，对于燃机启动环节当中，SFC 装置必须要达

到的各种转速而需要的定子输入电压也能够符合要求，研究了日常运行期间，

SFC 关于燃机发电厂的其它电气设备可能产生的谐波危害及相应抑制手段。 7

第 2 章燃气轮机变频器及控制说明

2.1 燃气轮机变频启动过程及特点

2.1.1 变频启动过程包括降速点火、启动提速、升速以及吹扫在内的四个阶段就是燃气-蒸汽联合循环发电机组相关的变频启动环节。参考图 2.1 可以知道，在时间的改变下，

SFC 启动期间某天然气电厂相关电气量的变化情况。

图 2.1 SFC 启动时序

（1）启动提速阶段同步发电机在该过程中的运行模式为同步电动机，通过盘车相关设备，使得其对应的速度能够上升至确定值，根据相关标准让 SFC 的隔离开关以及电源侧断路器能够依次闭合。SFC 在直-交可控逆变桥以及交-直可控整流桥启动的条件下，能够供应电压给其中的定子绕组。在 SEE 当中的隔离开关以及电源侧断路器都闭合了之后，初始触发就开始执行了，能够实现励磁电流的相关传导，将转子对应的磁场构建起来，可控硅整流桥相关的触发顺序取决于转子实际位置以及定子电压具备的极性，让定子相关的磁场能够始终保持在转子相关磁场之前，从而能够带动转子实现持续性的速度提升过程。

（2）吹扫阶段该过程实施的目的是防止点火期间出现爆燃现象，SFC 相关设备在此环节当中需要维持其转速以及输出电流在同一水平（900r/min）。

（3）降速点火阶段燃机的点火操作在完成吹扫阶段之后，因此要先对 SFC 相关设备实施降速，

把转速从原来的900r/min降到 480r/min，同时点火指令通过燃机控制系统（TCS）

来下达，发电机当中的定子电流以及电压在该过程中一直是 0。 8

（4）升速阶段在顺利的完成点火操作以后，机组在燃机以及 SFC 装置的作用下开始提升速度，在转速升高到 2250r/min的情况下，可以将 SFC 退出，使得燃机速度能够提升到额定的转速进行旋转操作，SEE 起励装置向发电机转子通入励磁电流，使得发电机完成并网操作，而后实现正常状态的发电。

2.1.2 变频启动特点

（1）通过图 2.1 能够知道，发电机在变频启动这个环节当中，对应的转速始终保持在比额定转速的 70%更低的范围中，同时机端电压的值是它 17%的额定电压，发电机运行在一个低频的工作状态中。

（2）SFC 在实施变频启动的时候，对应的直-交可控逆变桥进线侧以及交直可控整流桥出线侧当中存在一个直流回路，因为发电机和 SFC 之间是连在一起的，所以 SFC 将和接地位置构成对应的直流回路。

（3）发电机在变频启动期间，能够吸收其中的有功功率，而非发出，它的运行模式是同步电动机。

2.2 变频器应用的作用与意义调节异步电动机相关速度的方法非常多，关于转差率、极对数以及频率的调节就是其中的三个方式，并且是从原理来实施的分类。这些方法当中，能够获得最好效果，并且未来发展具备最大潜力的是利用变频器实施的变频调速方式。就异步电机的转动速度来说，通过变频器实施调节，除了能够实现调速的平滑无级之外，还能够比另外两个方法消耗更少的能量。因此，各大厂商以及公司当中最具优势的调速装置就是变频器，是在更新设备以及优化技术过程中的良好选择。

变频器在上个世纪 80 年代之后开始引进国内，它是工业领域当中非常关键的自动化设备，因为其能够对感应电机的速度实施平滑的改变，还能够做到更好的节能，所以它也实现了非常快的升级以及发展，变频器在众多的领域当中都有着极其关键的地位，包括各类公用工程项目当中、冶金、电厂、造纸、烟草以及化工相关领域。

就变频技术展开分析，它在各个行业当中都使用的较为普遍。通过变频器来说实施精准的电动机速度调节，能够做到十分显著的能源节约效果。在设计异步电动机的过程中，一般条件下都必须符合最大生产的标准，做到比较大的容量裕度；不过在现实使用当中，最大值可能会远大于负载的实际要求，使得异步电动机相关的效率变得更低。要是在调节速度的过程中利用到了变频器，那么就能够使得电动机相关的电磁转矩降下来，在此基础上能够使得其运行变得更加高效。 9

和欧美发达国家进行比较，国内目前在工业控制系统方面还是较为落后的，

不管是生产效率方面，还是生产设备的技术方面，都需要进一步的升级改造。对于异步电动机的速度来说，能够通过变频器实现一个更大范围当中的调节，并且有着非常快的响应速度以及非常精准的控制，也可以良好的应用于部分要求较高速度精度的场所，从而实现工业控制过程中更高的效率以及精度。变频器使用的具体意义如下：

- （1）节约能源；
- （2）降低电力线路电压波动；
- （3）减少电机启动时从电网吸收的功率；
- （4）精确调高转速；
- （5）精确改变工作转速；
- （6）改变最大转矩；
- （7）可靠地停运方式；
- （8）控制启动电流；
- （9）可逆运行控制；
- （10）减少传动装置的使用；

2.3 变频调速节能的原理变频器能够将具有一定频率（一般为 50Hz）的交流电流（单相或三相）变为具有调节性频率（主

要为 0~400Hz) 的三相交流电流, 下列是有关异步电动机转速的公式, 即 $n = 60(1 - s) / (2 - 1)$

其中:

- 转速;
- 频率;
- 转差率;
- 极对数;

根据上述公式所示, 可以看出异步电动机的转速与极对数、转差率及频率存在密切联系, 具体来说就是可以通过调节极对数、转差率或频率的相关数据, 在此基础上对转速展开调控。上述三个因素中, 通过调节频率所产生的作用效果最强。当异步电动机的频率处于在其工频范围内不断变化的情况下, 上述情况使得异步电动机的转速能够在相应的范围内产生变动。变频调速指的是利用上述原理达到控制异步电动机转速的目的。

以半导体为原材料制造的电力电子器件为主组成的变频器, 其本质上是 AC-10

DC-AC 电流变换器的一种。在其运作过程中, 首先在整流装置的作用下实现工频从交流到直流的转变, 在此基础上再构成电压型半桥逆电路从而使其产生所需频率的交流电流。在 MOSFET、IGBT 等全控性电力电子器件的运行下, 使得变频器能够把工频交流电源转化为在幅值、频率、相序、相位等方面符合负载所需的交流电, 并将其输入到电动机中。电力电子变频器的运行过程主要含控制、中间环节、整流、逆变四个部分。AC-DC 变换部分在由二极管结建的三相桥式不可控整流电路运行下, 在此基础上交流电流的使用率得到有效优化。为增强其控制能力, 使用 PWM 控制方式作用于其电路; 中间环节主要起滤波和缓冲作用。

在使用异步电动机进行工作的情况下, 传动轴上的有功输出与扬程、及水量之间存在的联系为: \propto 决定的数据, 在其转速平方与转矩成正相关及转速与水量成正相关的情况下, 能够通过降低电机的转速的方法从而减少电能的消耗量。

在电动机的转速从 n_1 变化到 n_2 的情况下, 其跟转速存在下列关系, 即: $n_2 = 1 \times 2^1 (2-2) 2 = 1 \times (2^1) 2 (2-3) 2 = 1 \times (2^1) 3 (2-4)$

根据式 (2-2) - 式 (2-4) 可以看出, 在其流量发现变化的情况下, 能够对其转速进行调节从而达到减少电动机的有功功率消耗的目的。具体来说, 在流量得到使用定额的 70% 的情况下, 能够通过调节变频器使得电动机的频率到达 35Hz

即其定额频率的 70%, 与此同时, 传动轴的有效功率会变成其定额有功功率的

34.3%。下图 2.2 是有关各个物理量间的关系曲线示意图。根据下图所示, 异步电动机能够以其负载所需条件对频率展开调节作用, 从而起到节约能源的作用。

图 2.2 运行曲线图 11

在流量下降的情况下, 仅仅是使用传统的调整阀门开度的方法只能加强其管网阻力, 将系统的作用点由 A 点向 B 点移动, 能够以长方形 H2BQ

20 的面积体

现出传统轴的有效功率; 假如使用变频器来调整电动机的转速这一方法, 会使得

其转速降低与此同时其管网性能不会发生变化, 使得该系统的作用点由 A 点向 B 点移动, 在此基础上, 该长方形 HBCQ20 的面积与传动轴输出的有效功率成

正相。由此可以得出, 在运用变频器之后, 能够减少长方形 H2BCH

B 的面积对应的有效功率的消耗。由于机械额外损耗跟其效率的变化情况, 在实践操作中, 运用变频器从而减少的有功达到 20%~50%。

2.4 变频器控制方式说明

2.4.1 正弦脉宽调制控制方式有关正弦脉冲宽度调制的使用益处主要包括其制造和维修成本低、机械特性优、操作便捷、使用到的电力电子器件较少、能够运用到化工、冶金、电力等多个产业生产制造中、符合电动机在诸多场合情况下的调速需求等。当然正弦脉冲宽度调制也存在一些缺陷, 例如, 该方式在频率方面的作用力不足, 在当其频率较低的情况下, 定子电阻会对输出转矩产生较严重的影响作用, 导致其在低频状态下的转极限较低。除此之外, 在一些对转速精准度有着一定要求的场合下, 其作用效果很难满足需求, 此外其反映速率也需要得到加强。在转速较低的情况下,

由于全控器件与定子电阻存在死区, 从而产生较大的谐波, 并导致失稳状况的发生。

2.4.2 电压空间矢量控制方式电压空间矢量控制又称为矢量脉冲调制。在对三相电力电子器件导通角展开调节作用情况下, 能够形成理想状态的圆形旋转磁动势。三个支路间的联通能够形成 8 组不同的变量, 里面有六组能够形成有效的状态, 从而形成圆的外接六边形; 还有两组形成零向量。从这里可以看出, 全控桥中的三条支路是由 SVPWM

对其展开同一的调节管理作用, 以相关数学方程式使得其内切多边形尽可能变成

一个圆, 在这基础上构成三条支路的控制脉冲。在实际运用过程中, 通过加强其反映速率及稳态精准度, 以此来保障系统的稳定性, 具体表现为, 导入反馈过程,

调节频率数值, 能够有效减少 SPWM 中存在的定子电阻障碍影响。由于必须采用极其繁琐的数学方式对内切多边形的外形展开调控, 使得其最后能够尽可能的转变为圆形, 而且不可以调节输出转矩, 因此其实用性不大。 12

2.4.3 矢量控制方式以变换坐标的方式展开 VC 控制行为, 具体表现为, 把静止状态下坐标上的定子三相电流转移到转子中, 最终产生旋转状况坐标系中两相电流 I_{t1} 、 I_{m1} 。两相电流中, I_{mt1} 与直流电机中的励磁电流 I_f 相对应, 而 I_{lt1} 则充当于直流电机中的点数电流 I_a 。在此基础上, 能够对异步电机展开调控作用。坐标变换主要是通过把异步电动机当作直流电动机展开研究, 分别对其磁动势及转速展开调控。

在对磁动势展开调控的作用下, 能够间接地展开对其旋转磁场及输出转矩的调控。

VC 控制方法是有关变频技术的一大发展性创新方法, 其具重要的理论研究价值。

然而在其实际工作进程中, 因为存在很难得到转子磁动势等方面的技术难题, 导致很难完成将异步电动机向直流电动机的等价转变目标。

2.4.4 直接转矩控制方式对定子磁场采用 DTC 控制方法展开控制作用的分析, 在此基础上实现对输出转矩及磁动势的直接调控。在运用 DTC 方法的作用过程中, 不需要把异步电动机与直流电动机向等同在一起, 因此不需要进行大量繁琐的数据分析

，也不用变换其有关坐标，除去了把直流电机控制量分耦成交流异步机控制量的阶段。

2.4.5 矩阵式交-交控制方式

SVPWM、DTC、VVVF 等变频方法都被归纳为 AC-DC-AC 变频方式。AC-

DC-AC 在其变频过程中存在以下几个方面的缺陷，即会产生较大谐波、电网侧功率因数较低，不能接收异步电动机为电网输入的能量及需要大容量的电容进行能量缓冲等问题。对此相关研究人员提出了新型的控制方法，来改善上述内容中存在的缺陷，即矩阵式 AC-AC 变频。这一方法能够直接将交流电转化为交流电，

这一过程中不用采用大容量的缓冲电容也不存在直流过程，除此之外具有体积小、

成本低、可调节功率等优点，还能够达到电动机向电网反馈能量的目的，该变频方法最突出的优点就是能够直接调控转矩。

2.5 本章小结为了确保本次设计的科学性，需要重点探究变频改造技术的控制方法与运行机制，同时会对变频启动的所有环节中涉及的一些规律如转子转速，定子电流以及发电机定子电压等展开探究。 13

第 3 章变频器在燃气轮机应用中的难点及解决方法

3.1 低压变频启动与运行力矩低的问题由于技术的限制，一些包含西门子产变频器，日本产变频器等低压小型变频器存在一定的缺陷，例如其无法参与矢量控制工作。

某电厂 3 号循环水泵变频装置投入使用，变频器考虑带一台循环水泵调速运转或者工频运行。如图为具体的运转机制：

图 3.1 循环水泵变频器原理图其中，不互锁的是 KM1 与 KM3，互锁的是 KM2 与 KM3，并且呈现出不闭合状态的是 KM2，KM1，断开 QS2，QS1。联锁的为 KM1、KM2 和 QS1、QS2，

电压互感器是 PT，真空接触器是 KM1、KM2、KM3，刀闸隔离开关是 QS1、QS2。

电机工频在工作的过程中，其流程包含 KM1 合上，KM3 断开，KM2 合上。

这是在“工频切变频”的信号达到变频器之后完成的。

目前在规定的频率区间中，相应的变频器会无法正常运转，其中，变频装置的运行频率区间是 4 至 20Hz，另外变频器的规格为额定功率是 1120 千瓦，额定转速是 594r/min，循环水泵电机是八级异步电动机，选择 Allen-Bradley 企业制造的 1305BA09-HA2 型交流变频器。

1、机械板块通过人工操作盘动。这是由于循环水泵会中止工作，而变频器会跳闸。

2、发生跳闸的概率极大，这是由于启动机器时，存在循环水量过多，电动机负载超载的情况，并且 3 号循环水泵停工的时间过长。

3.1.1 产生的原因其中，由于循环水泵搁置时间过长，从而产生跳闸，使得机组启动与其稳定性遭到破坏，同时频率—力矩曲线会因为频率过低而使得循环水泵机械部分难以正常运转，同时电动机无法通过较长的电缆将变频器输出的电压顺利传输。因为 14

过长的电缆线会存在较大的电阻和电感，从而使得变频器无法正常运转，结合 3

号循环水泵变频装置的基本规格来看，其包含非矢量控制型的变频器，并且要求其不能使用大于 50m 的动力电缆。

3.1.2 影响变频输出力矩过低的原因

总体而言，循环水泵的变频输出力矩受到三类要素的作用。

A、散热效果不佳的电动机。

B、其中，输出电压过长造成的串联谐振与电压损耗，也就是实际运行频率段，载波频率和输出电压都与变频器密切相关，并且会对其正常运转产生影响，基于电动机气隙磁场，V/f 曲线与相关概念分析得出结论。

C、针对循环水泵机械板块而言，极大几率会发生大流量循环水启动或者空管启动的情况。

3.1.3 改造的优先级为了符合输出力矩的相关条件，优先级的至关重要的参数条件。

第一步：优化启动以及运行力矩等变频器涉及的相关运行参数：1、减少变频器的输出载波从而避免线路对电感产生的负面效果；2、电压需要增加，以确保电动机的工作运行；3、变频器的 V/f 曲线需要提高从而保证电动机能够工作。

第二步：增加循环水泵电机的转速，此举措是基于循环水系统的运行效率以及稳定条件得出的。

上文提及的方法能够确保变频器的正常运转，同时也符合变频器的负载条件。

3.2 变频一次系统失电再启动问题

3.2.1 变频器一次电源失电再启动过程中的动作机理为了避免跳闸的情况发生，需要设置超过额定电压 70%的直流母线电压，选择 IGBT 型功率管的变频器，如果未设置低电压保护变频器，功率管会受到长时间的低电压大电流的影响，同时直流母线的电压的减少，变频器的逆变功率管所输出的电流会增加至负荷标准。并且直流母线供电需要整流回路的电压达到相应条件，直流母线电压能够使变频器负荷重新运转，变频器整流回路的输出会终止。

电场的用电系统更换时，整流器输入电压的下降速度会超过变频器的直流母线下降速度。

其中，变频器重启之后的作用受到两类参数的影响。

1、为了对变频器所输入的交流电压进行测试，相应的失电再启动功能需要计算出电压的合理区间范围，即电压阈值。 15

2、当提前设置了失电再启动功能的启动时间，电源输入电压不符合要求就会使变频器停止运转。考虑到电厂需要变频器在规定时间内正常工作，因为电压在断电之后重新输入会使得值班员和机器设施受到影响，即需要设定 2-10s 的失电再启动功能触发时间段，即失电再启动功能时间。

3.2.2 变频器一次电源失电再启动功能存在的问题及改善方法变频器在经过电源失电再度启动的时候，就不会再输出电压了，这样很容易导致出现负荷较大的情况，所以变频器在经过电源失电再度启动的时候不能采用太高定值的电压，若电压的定值在这种情况下过高，很容易导致变频器闭锁；同样地，电压定值也不宜设置过低，过低也会导致其他严重问题的出现。因此，设置电压定值的时候不能盲目，要根据实际情况来进行综合考虑。

运用电源失电再启动的措施需要保证直流母线得到的电压值能够维持正常运行。为能够充分利用变频器的这一功能，需要通过科学、合理的方法来提高变频器直流母线的电压值。对于解决出现变频器直流母线水平太低的问题，以某电厂 3 号凝结水

泵变频为例，有以下两个方案可以采纳：

方案一：西门子提出调整变频器电源失电再启动的电压定值，由原来的 78V，2 秒变成 85V，5 秒。

优点：经过此番调整，因为 6kV 一次电压下降的时候对输出电压进行了闭锁，使得变频器直流母线上的电压受到的影响会小一些。

缺点：主要有以下两点：

（1）随电压定值的升高，变频器闭锁的时间也会变长，导致在对 3 号凝结水泵时进行启动的时候需要花费 3-5 秒的时间，从而容易导致锅炉遭到损坏。

（2）3 号凝结水泵会在频繁的启动-失电往复操作中承担过高的负荷。

方案二：对变频器的变比进行调整使得高变频器能够输出更高的二次电压，也就是用 6140V/1270V 档来替代原来的 6300V/1270V，从而提高变频器直流母线上的电压值。

优点：提高变频器直流母线电压可以促进凝结水泵的启动过程，也就是说在提高电压值过后，方案中所提到的限制性也会相应地被降低。

缺点：当变频器调整轻载或者转速改变的时候，直流母线电压也会发生变化，但变频器电压定值是 6kV，在运行的时候不能接入大于 7.2kV 的电压。

3.3 变频器控制电源问题用于变频器的风扇，信号和控制等能源称为参考能源。与变频器中使用的主要电源不同，它主要用于中高压变频器，而不是在比亚变频器中。 16

3.3.1 稳定变频器对电源进行控制的重要性在运行变频器的时候，控制电源所起到的作用是非常关键的，变频器的运行需要从电源处获得强大的动力。本文选取西门子中压变频器作为案例来进行分析。

这一变频器采用了三相四线制三相电源作为控制电源，若在运行变频器时，波动范围超过了预设，那么运行过程就会停止，这显然会使得电厂系统的连续运行遭到严重破坏，与此同时还可能出现散热系统异常、控制系统异常、系统信号异常等问题。在运行电厂的时候，由于控制电源故障而中止变频器运行的情况时有发生，且这样的情况在进口变频器中比较常见，比如说西门子企业、ABB 公司等国际知名企业所制造的变频器。从上述分析中我们可以发现，控制电源的正常运行是保障变频器安全稳定运行的重要内容。

3.3.2 可靠的控制电源具体要求变频器控制电源的正常运行是保障变频器运行的关键环节。就西门子而言，在生产操作完成的时候，一般情况下要对 UPS 设备进行选择，对于变频器，除了专用控制室中的电源外，其电源还具有可共同支持变频器的 UPS 电源。但是，

此方法尽管在某种程度上能够为变频器提供稳定且可靠的电源，但假设在电源故障时，变频器的耗散热量系统会自动发送故障信号，从而使变频器的平稳运行受到不利影响。

从上述分析我们可以得出结论，为了使得变频器能够平稳运行，电厂在选择电源动力的时候应该采取电源与 UPS 电源双电源切换结合的方法。在一般情况下，需要对下列条件进行满足：

1、在运行电源时需要对先后顺序进行合理安排；

2、为保障变频器的运行平稳，运用其他电源和主电源相结合的方式；

3、为保障变频器的运行平稳，在运行电源时尽可能压缩切换时间；

4、对于不同的电源要相应地选择不同的电压。

指 标
疑似剽窃文字表述
1. 半导体为原材料制造的电力电子器件为主组成的变频器，其本质上是 AC- 10 DC-AC 电流变换器的一种。
2. 电压型半桥逆电路从而使其产生所需频率的交流电流。在 MOSFET、IGBT 等全控性电力电子器件的运行下，使得变频器能够把工频交流电源转化为在幅值、频率、相序、相位等方面符合负载所需的交流电，并将其输入到电动机中。电力电子变频器
3. PWM 控制方式作用于其电路；中间环节主要起滤波和缓冲作用。 在使用异步电动机进行
4. 70%的情况下，能够通过调节变频器使得电动机的频率到达 35Hz 即其定额频率的 70%，与此同时，传动轴的有功功率
5. 流量下降的情况下，仅仅是使用传统的调整阀门开度的方法只能加强其管网阻力，将系统的作用点由 A 点向 B 点移动，
6. 假如使用变频器来调整电动机的转速这一方法，会使得 其转速降低与此同时其管网性能不会发生变化，使得该系统的作用点由 A 点向B
7. 长方形 H2BCH B 的面积对应的有效功率的消耗。由于机械额外损耗跟其效率的变化情况，
8. 频率较低的情况下，定子电阻会对输出转矩产生较严重的影响作用，导致其在低频状态下的转极限较低。
9. 失稳状况的发生。
2.4.2 电压空间矢量控制方式电压空间矢量控制又称为矢量脉冲调制。在对三相电力电子器件导通
10. 静止状态下坐标上的定子三相电流转移到转子中，最终产生旋转状况坐标系中两相电流 It1、Im1。两相电流中，Imt1 与直流电机中的励磁电流

11. 异步电动机向直流电动机的等价转变目标。
2. 4. 4 直接转矩控制方式对定子磁场采用 DTC 控制
12. 变换其有关坐标，除去了把直流电机控制量分耦成交流异步机控制量的阶段。
2. 4. 5 矩阵式交-交控制方式
SVPWM、
13. 变频器在燃气轮机应用中的难点及解决方法
3. 1 低压变频启动与运行力矩低的问题
14. 电场的用电系统更换时，整流器输入电压的下降速度会超过频器的直流母线下降速度。
其中，变频器重启之后的
15. 方案可以采纳：
方案一：西门子提出调整变频器电源失电再启动的电压定值，由原来的 78V，
2 秒变成 85V，5 秒。
优点：经过此番调整，
16. 变频器的变比进行调整使得高变频器能够输出更高的二次电压，
也就是用 6140V/1270V 档来替代原来的 6300V/1270V，
17. 变频器控制电源问题用于变频器的风扇，信号和控制等能源称为参考能源。与变频器中使用的主要电源不同，
18. 高压变频器，而不是在比亚变频器中。 16
3. 3. 1 稳定变频器对电源进行控制的重要性在运行变频器的时候，控制电源
19. 进口变频器中比较常见，比如说西门子企业、ABB 公司等国际知名企业所制造的变频器。从上述分析中我们可以发现，
20. 程度上能够为变频器提供稳定且可靠的电源，但假设在电源故障时，变频器的耗散热量系统会自动发送故障信号，从而使变频器的平稳运行
21. 为了使得变频器能够平稳运行，电厂在选择电源动力的时候应该采取电源与 UPS 电源双电源切换结合的方法。

3. 008_第3部分		总字数：9460
相似文献列表		
去除本人文献复制比：26%(2461)		文字复制比：26%(2461) 疑似剽窃观点：(0)
1	SFC装置在燃机启动过程中的Simulink可视化仿真 舒杨(导师：范春菊;毛建民) - 《上海交通大学硕士论文》 - 2015-04-01	25. 6% (2421) 是否引证：否
2	03100_1120312047_舒杨 舒杨 - 《学术论文联合比对库》 - 2015-05-08	25. 1% (2378) 是否引证：否
原文内容		

3. 4 本章小结综合上述分析内容我们可以发现，在改造变频器的時候，因为变频器本身特征、性能或者电厂实际情况等因素的影响，存在许多需要解决的问题。同时在改造变频器的过程中，研究人员除了对实际情况进行结合分析以外，还对变频器的工作性能、原理等进行了深入研究，期望能够对相关技术进行提升和改造。 17

第 4 章 静止变频器的设备及工作原理

4. 1 同步电机的变频调速原理同步发电机被用作同步电动机，来自自身厂用电的有功电能注入定子绕组，绕组在三相交流电的影响下，生成被旋转的磁场；另外经过整流后的电流送入 转子绕组，形成一个静止的磁场，这两个磁场之间会在相互作用下产生磁力矩，使得转子也一同进行旋转，且频率和前面注入定子交流电的频率相同，负责对负载进行拖动，此时主导者是定子的磁通，被导者是转子的磁通。如果到同步发电机电网的有功功率的产生为正值，则自身厂用电引入同步电动机的有功功率为负，

即功率因数为负或功率因数提前。当同步电动机用作发电机时，转子通过外部动力学 旋转，整流后的励磁电流进入转子绕组后会产生旋转磁场，从而在定子上产生感应电动势，此时主导者是转子的磁通，被导者是定子的磁通。负载后，发电机将有功功率传递给负载，而无功电能则被转换。通常，负载是非电容性的，

所以稳态电流的稳态电压（即稳态电压锁存因数）对于 cos 校正为正。因此，同步发动机的可逆性原则上允许燃气涡轮发动机的同步发电机在启动过程期间作为同步发动机运行，以对燃气涡轮发动机的启动过程进行完成。

同步电动机中同步的含义指的是转速（转/分）和供电频率之间存在正比关系。由式 = 1= 60 1/ （4-1）

我们可以看出，把转子转速设为，把定子旋转磁场转速设为1，供电频率设为，此外，转子磁极对的数目设为。此时如果我们提高对电机的供电频率，

那么电机的转速也就能得到提高。通过控制电机的转速大小，我们可以把电机灵活应用于适合的工作环境。

4. 2 静止变频器的功用与设备组成

4. 2. 1 静止变频器的作用根据相关理论，SFC 具有以下几个作用：

（1）静止变频器可以为机器的启动提供相应的动力，比如说燃机的启动需要一定的转速与扭矩，而静止变频器恰好可以为燃机提供所需的转速与扭矩。

（2）静止变频器能够具有一定的清洁吹扫能力，比如说余热锅炉型联合循环发电厂启动前在排气扩散段和余热锅炉内会存有可燃气体，静止变频器能够对 18

其进行清洁和吹扫。

(3) 静止变频器能够让机器以怠速平稳运行，比如某些燃气轮机需要保持在 500~800r/min 的转速待机，来进行叶片的清洁，那么静止变频器便可以帮助燃气轮机实现。

根据图 4.1，一套完整的燃气轮机的 SFC 启动系统工作流程如图所示，

图 4.1 燃气轮机发电机组静止变频启动系统配置根据上图，我们来对其进行分析。首先，在燃气轮机启动的时候，发电机此时并没有开始工作，SFC 根据燃气轮机启动所需要的相关数据来获得关键的取电功率。SFC 对同步电动机下达指令，让它以变频电动机的形式进行旋转，这就让燃气轮机开始缓慢的启动起来。其次，SFC 要完成燃气轮机的清吹工作。其主要原理是 SFC 以 0~35Hz 的超低频率，对同步电机下达指令，把燃气轮机的工作转速调到稳定的怠速状态。这个步骤完成之后，燃气轮机开始点火，最后完成点火

工作。点火完成之后燃气轮机将逐渐进行加速，转速不断提高到 2500r/min 时，

SFC 便完成了它的任务不再工作，而同步电机作为燃气轮机的启动机也结束工作。最后，燃气轮机机组根据工作环境，自行增加转速到工作所需要的额定转速。

在整个过程之中，SFC 系统总共需要工作 14 分钟，燃气轮机机组从零转速到启动最后达到工作所需的额定转速需要花费 18 分钟。

4.2.2 静止变频器的设备组成与相关工作原理静止变频器的工作原理理解起来并不困难，首先静止变频器根据相应的同步电动机工作所需的电压与频率，选择好电压与频率相同的供电电网来进行供电， 19

然后再向同步电动机输出符合要求的输出电功率。根据静止变频器的电路结构进行划分，静止变频器一共有直接静止变频器和间接静止变频器这两种类型。直接静止变频器的工作原理是将工作交流电直接转换为可控频率的交流电，所以将其称为直接静止变频器，即交—交变频器。而间接静止变频器的工作原理要比直接静止变频器来得负责一点，首先它先将工频交流电转换成直流电，然后再进行直流电逆变成变频交流电的复杂操作，所以将其称为间接静止变频器，即交直交变频器。接下来将进一步介绍一种常见的交流—直流—交流变频器，它主要是用于燃气轮机机组启动过程。

1. 晶闸管晶闸管在上个世纪五十年代被发明出来，它的问世，使得半导体在强弱电领域得到了规模空前的应用。不论是在工业制造领域还是在其他领域，都充斥着晶闸管的身影。

(1) 晶闸管基本结构。

晶闸管作为一种新型的大功率半导体器件，它的结构并不复杂，总共也就四层结构，并且由图 4.2 所示，晶闸管的 PN 结的数量也不多，总共有三个。简单的结构让晶闸管的生产并不困难，可以大规模、大批量地进行生产。

(a) 结构图 (b) 等效电路图图 4.2 普通晶闸管的结构和等效电路

(2) 工作原理根据上文所述，晶闸管的结构简单，根据晶闸管的主要电路图所示：负载与晶闸管的阴极(K)相连接，而阳极(A)则是直接连接电源，对晶闸管进行供电。当晶闸管工作时，其内置的控制电路便会发挥作用：将晶闸管内部的电子器件与晶闸管的阴极 K 和控制极 G 相互连接。晶闸管作为一种半控型电力电子器件，它正常工作所需的条件并不复杂，具体条件如下：

a. 当晶闸管受到来自反向阳极的电压时，晶闸管将会处于一种反向阻断的状态，在这种状态下，晶闸管不管受到何种电压都将施加于门极。

b. 当晶闸管受到来自正向阳极的电压时，只有在正向电压施加于门极的条件下，晶闸管才会进行导通。正是因为在此时，晶闸管恰好处于一种正向导通的状态 20

态，所以晶闸管所具有的特殊闸流特性才会产生。

c. 当晶闸管在已经完全导通的情况下，一旦对其施加一定量的正向阳极电压，那么不管晶闸管的门极电压状态如何，晶闸管都会保持当前导通的状态。

d. 在一般条件下，当晶闸管处于完全导通的状态时，只有在主回路电流或电压不断减小，甚至无限接近零的时候，晶闸管才会结束工作状态，不再发生反应。

2. 静止变频器根据图 4.3 所示，它是一种电流型变频器主电路的电路结构。在这个电路结构中，滤波器、逆变器和相控整流桥是它的主要组成部分，缺一不可。滤波器在电路之中的作用在于它可以改进整流桥输出的直流电压的脉动程度；逆变器在电路之中的作用在于它可以把电流源输出的电流逆向转变为频率可变的阶梯形交流电流；而三相全控整流桥电路之中的作用在于它可以将上游输入的工频交流电压转变为工作所需的可变的直流电压。需要注意的是，由于电流源的内阻很大，因此，逆变器输出的交流电流的波形不受负载的影响。

图 4.3 变频器主电路

(1) 三相全控整流电路其原理图如图 4.4 所示：

图 4.4 三相桥式全控整流电路原理图不同的晶闸管功能不一，因此我们需要对其进行分类。一般来说分为两种类型：共阳极组和共阴极组。其中共阳极组有晶闸管 VT2、晶闸管 VT4、晶闸管 VT6 三种；而共阴极组有晶闸管 VT1、晶闸管 VT3、晶闸管 VT5 这三种。其具体的工作原理就是 VT4、VT6、VT2 这三个共阳极组的晶闸管与 a、b、c 三相电源相接；而共阴极组的 VT1、VT3、VT5 这三个晶闸管与 a、b、c 三相电源相接。

a. 带电阻负载时三相桥式全控整流电路的工作情况当三相桥式全控整流电路工作时带电阻负载，整个电路内部角的移相范围是 0°~120°。

b. 带阻感负载时三相桥式全控整流电路的工作情况当三相桥式全控整流电路工作时带阻感负载，整个电路内部的角移相范围为 0°~90°。

c. 对三相桥式全控整流电路进行定量分析首先在同一个周期以内，三相桥式全控整流电路每次脉动的波形相同，并且考虑到如果想要计算出整个电路的整流输出电压平均值，我们还需要将其波形脉动 6 次的频率结合在一起。综合上面的计算因素，我们只要对同一脉冲进行计算。除此之外，当以线电压与时间坐标为例，我们还需要考虑到连续的电压输出波形这个关键因素。在计算中我们假设两者的零点一致，当整流持续输出电压时整流电压的平均值为：

$$\int_0^{\pi} \sqrt{6} 2 \sin(\omega t) dt = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} \int_0^{\pi} \sin(\omega t) dt = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} [-\cos(\omega t)]_0^{\pi} = \frac{2\sqrt{6}}{\pi} (1 + 1) = \frac{4\sqrt{6}}{\pi}$$

$$= 2.342 \cos (4-2)$$

带电阻负载且 $\alpha > 60^\circ$ 时，整流电压平均值为：◆◆◆= 3

$$\int \sqrt{62} \sin (\alpha) \text{ ◆◆◆ } 3 +$$

$$= 2.342[1 + \cos (\alpha + 3)] (4-3)$$

(2) 三相全控逆变电路根据图 4.3，我们可以知道，图中所采用的整流器型号为三相全控桥式整流器。该整流器内部的电感滤波器能够有效的降低上级逆变器所输出的电流之中的谐波分量，在此过程之中，它还能够确保逆变器的电流原来的特性。在这个周期之中，逆变器所产生的三相电流能够在该周期之中进行分析。根据图 4.5 可知，

在总个过程之中，晶闸管的分布位置如图所示，但在工作中，只有两个晶闸管在同时工作，而且一个晶闸管属于共阳极组(T1, T3, T5)，另外一个晶闸管属于共阴极组(T2, T4, T6)。22

图 4.5 逆变电路晶闸管布置图其中 120° 跟 240° 是晶闸管的导通角度和开关角度，因此每次转动 60° 都要转变一次逆变器，晶闸管的导通始于 T1，在 T6 终止，经过 T1 形成往返流程，逆变器反复一次，周期性的三相对称电流就会生成一次。 60° 电角度是各个电流表换向电流（即转变电流的流向）的周期，并且呈 60°

电角度周期性转换，比如电流想要从 B 相转换成 C 相，那么进入的电流应该是由 $0^\circ \sim 60^\circ$ 电角到 $60^\circ \sim 120^\circ$ 。

(3) PWM 控制基本原理在调整了脉冲宽度的情况下，正弦波或是其他波形可以用 PWM 控制得到相同的效果。

图 4.6 PWM 波代替正弦半波示意图对图 4.6 (a) 进行分析，将其半个正弦波平均分成 N 等份，换句话说就是把若干个宽度相等的脉冲波拼接成半个正弦波。当跟脉冲的数量的比值与宽度相等时，幅度数值各不相同，其中脉冲顶端不是水平线而是曲线，正弦曲线的变化规则和各个脉冲的幅度数值变化相同。上脉冲可以使用宽度不同，幅度数值相等，23

数量一致的矩形脉冲来进行替换，并且在两者含有的面积相等的情况下将相对应的半个正弦波的中点与矩形脉冲的中点呈垂线的形状，如图 4.6 (b) 中的一组脉冲所示，也是文中所研究的 PWN 波形来源地。

根据调制法，其中的载波主要是指要被调制的信号，并从中获得相应的波形，

目标 PWM 波是通过调制信号波来获得。由于等腰三角波的落点呈线性且横竖坐标左右对称的特性，等腰三角波可以替换普通载波，当三角波碰到变化幅度相对较小的调制信号波，两者重叠的位置与回路中晶闸管的开关位置相同，得到的脉冲宽度与信号波幅度数值的比值为某一常数，这一特点符合 PWM 控制的相关准则。通过将信号波调制为正弦波，最后所调制的结果是 SPWM 波形，在研究中普遍使用了这一调制方法。

(4) 三相桥式 PWM 型逆变电路图好 4.7 三相桥式 PWM 型逆变电路从图 4.7 可知，这是一个以双极性为主要控制方式的三相桥式 PWM 型逆变电路。把一个公用三角波载波◆◆◆

当作 U、V 以及 W 这三相的 PWM 控制，相位相隔 120° 依次排列三相的调制信号◆◆◆、◆◆◆和◆◆◆

。这三相有着相同控制规律的功率开关器件，如下是对 U 相进行相应的研究总结。在◆◆◆>

的情况下，要事先假设直流中点为 N，关闭下桥臂 V4，同时将上桥臂 V1 导通，这时 U 相对应点导出电压副值为◆◆◆的二分之一。在◆◆◆<

的情况下，关闭 V1 同时导通 V4，

这是两倍的◆◆◆

◆◆◆' 等于负。其中被轮翻牵动的装置是 V1 跟 V4。在触动了 U1 或者是 U4 的情况下，V1 (V4) 导通或者二极管 VD1 (VD4) 续流导通是根据阻感负载的电流方向来确定的，这一情况类似于双极性控制单相桥式 PWM 型逆变电路。

通过对 U、V、W 三相的工作进行一致运行研究，能够总结出如下方式：◆◆◆'、'、'

' 的 PWM 波形幅值只在正负各占一半两种电平中存在。

上图的◆◆◆

的波形可以在◆◆◆' - ◆◆◆

◆◆◆' 的情况下取得。综上可得，当疏通了桥臂 6

和 1，这时◆◆◆=

，，当疏通了桥臂 3 和 4，这时◆◆◆= -

，，当疏通了臂 4 和 24

6 或是臂 1 和 3，这时◆◆◆

◆◆◆= 0。根据上述分析，PWM 波是根据逆变器线电压的三种各不相等电平 0、◆◆◆◆

和-◆◆◆◆

导出的图形构成的。下列公式是通过负载相电压◆◆◆◆

总结出来的：◆◆◆◆= ◆◆◆◆' - ◆◆◆◆' + ' + ' 3 (4-4)

由公式 (4-4) 和波形图得出结论：0、 $1/3$ ◆◆◆◆、 $-1/3$ ◆◆◆◆、 $2/3$ ◆◆◆◆

以及 $-2/3$ ◆◆◆◆

这五类不同的电平构成了负载相电压的 PWM 波。

4.3 本章小结本章介绍了静止变频器 (SFC) 装置如何使燃气轮机的同步发电机在启动过程中能够作为同步电动机使用，拖动燃气轮机转动来完成燃气轮机机组的启动过程，同时详细介绍了静止变频器的设备组成和主要设备 (三相全控整流桥、三相全控 PWM 型逆变桥) 的工作原理。25

第 5 章静止变频器在燃气轮机启动过程中仿真及谐波分析

5.1 三相十二脉冲全控整流电路分析根据图 5.1 所显示的内容，12 脉冲全控整流桥结构通过此模型显现的清楚了。制造出一个可以导出 6.3kV 的初始交流电压且频率为 50Hz 的三相交流电压源来作为图中主要的创作理念，中途经过一个接线组别为 Dy11d0 的三绕组

(6.3/2×1.45kV) 三相变压器，通过上述操作能够获得两组相同的线电压，且三相交流线电压值是 1.45kV，然后将其分别流入两个六脉冲全控整流桥，这两组六脉冲是一个十二脉冲发生器发出的，在通过整流桥整程序后，最终连接起所有的

直流电压。文中所需要的直流电压由此而来。

图 5.1 12 脉冲全控整流桥

上图是某一燃气电厂的 SFC 隔离变压器的模型，将在厂用电引出 6.3kV，在SFC 的逆变以及整流的情况下，将途经隔离开关的变频交流电导向发电机的定子中，从而进一步加大机组升速，使其整流部分最终达到可以自身维持转速。

根据图 5.1 所显示的模块，Bus 模块是一个三相交流电采集模块，后面的三相三绕组变压器以及十二脉冲发生器中的电流是三相交流电导出的。

其中图 5.1 所展示的 12-Pulse Generator 模块是 12 脉冲发生器的运作轨迹。

ABC 三相初始电压输入、alpha_deg 触发角度、脉冲发生结束设定成 Block、频率设定成 Freq 这四类都是其的左侧可以输入信号值。由于脉冲发生器的触发角 26

度会对整流桥输出的直流电压幅值有影响，当 $U=2.34U_{cos\alpha}$ 时，因此触发角度值发生了变化，最终能够获得研究中所需的直流电压幅值；在 Bus 电压采集模板的情况下，三相交流电压源可以对 ABC 三相初始电压提供所需的交流电，为了模拟真实的工作状况，将 Freq 频率值设定为工频 50Hz 的电压。当脉冲发生终止Block 端口的数值设置为 0 的情况下，便是不停止工作，脉冲发生器会进行正常的运转。

图 5.2 6 脉冲发生示意图根据图 5.2 的有关曲线显示，六脉冲波形由十二脉冲发生器发出的图形，从中观察到在第 0.02 秒到 0.04 秒期间内有一个交流电变呈周期性转变，在这一周期内整流桥的疏导是脉冲发生器通过发出了六个相同的矩形脉冲来完成的。然而图 5.1 所显示的 Three-Phase Transformer (Three Windings) 模块是三相三绕组变压器所产生的，其变比是 6300/1450/1450，接线组别是 Dy11d0，容量是 5300kVA，

跟这一数据相同的还有燃气电厂 SFC 隔离变压器的相关数据。由于电压波形的幅度值过高，是其有效值的根号 2 倍，所以 Uab 作为 Y 型压器低压侧线电压。

在图 5.1 的显示结果中可以看出，研究人员还对三相三绕组变压器低压侧的

△型和 Y 型 A 相电流的测量结果作出了分析，结果发现 Y 型衔接方法的低压侧相电流比△型的相比提高了 30°。根据图 5.3 电流波形分析总结出，三绕组变压器的基础上由于△型和 Y 型的二次绕组衔接方法，在相位上其两个部分前后的 27 三相交流电有 30° 的差距，造成整流桥所流出的电压出现 12 次脉动的情况，而且是在同一个电源周期期间，这也是 12 脉冲整流电路产生的原因。

图 5.3 Y 型-△型变压器低压侧相电流 Ia

b

5.2 SFC 装置在燃机启动过程中的可视化仿真在燃机即将开启的时候，第一步是根据燃机控制系统（简称 TCS）的情况挑选一台 SFC 来作为开启的装置，SFC 装置接收到 TCS 的来的命令，且开关的切换控制以及 6kW 断路器控制都是用 SFC 来完成的；在 SFC 开启励磁系统的同时有效的控制励磁电流的输出量，把可以变化的频率的交流电压导入到发电机的定子当中，让发电机处于电动机运行状态，同时通过吹扫（如需）拖动燃机使其转速高达 2100 转/分。其达到这一转速之后，SFC 接收到 TCS 撤退的指令，让燃机自我运行，最后转换开关复位和励磁撤退的指令由 SFC 发出。

图 5.4 燃气轮机组启动曲线由上图燃气轮机的日常启动曲线可得知燃气轮机的运行机制，燃气轮机要开 28

启吹扫功能必须发生了跳机，但在日常启动中通常跳过吹扫阶段，故本次日常启动跳过本阶段。图 5.4 燃气轮机启动曲线图由多条彩色线条构成，不同颜色分别代表燃气轮机的不同参数。红色代表发电机的转动频率，蓝、白、橘线表示定子电压线电压。本次主要研究的曲线是红蓝两线，两坐标轴分别为时间变量和百分比。为更好地了解燃气轮机启动运行过程，列出了以下表格。表格附加信息有红线代表的转速基准值为 60 转/秒，蓝线代表的线电压基准值为 26kV。根据此曲线图，选取几个节点进行研究分析，相关结果如下：

表 5.1 燃机机组启动曲线节点分析序号时点 SFC 运行阶段发电机转速 r/min 发电机频率 Hz 定子线电压 k V

1	9:06:48	投运	0	0	0	2	9:07:10
		持续提供定子电压	360	6	2.6	3	9:08:00
		持续提供定子电压	1080	18	2.6	4	9:10:20
		持续提供定子电压	2232	37.2	2.6		
5	9:10:30	退出	2448	40.8	0		
6	9:11:20	退出	3000	50	21		

表 5.1 中选取燃气轮机组启动曲线中五大重要时间节点如下：

上午 9:06:48，SFC 装置启动投运，此时发电机是电动机的运行状态。

上午 9:07:10，蓝线产生了较大波动，其主要在于发电机开始以电动机状态运行，拖动燃机负载转动，启动点火装置。

上午 9:08:00，蓝线波动减小，是由于燃机处于低负荷状态，此时燃机两种燃烧方式并存，即预混和扩散两种燃烧方式并存，这就导致机组负荷不断上升，最后扩散燃烧比重远大于预混燃烧，形成以扩散燃烧方式为主要燃烧方式。

上午 9:10:20，蓝线开始走下坡趋势，随着装置转速加快至 2232 转/分左右，

SFC 装置便减少将交流电压输入给发电机定子。

上午 9:10:30，蓝色趋于零，其主要原因在于 SFC 装置已停止向发电机定子供压，此时该装置已停止运行，发电机由燃机拖动运行，直至达到工频转速。

上午 9:11:20，蓝线电压发生巨大波动，由 0 急剧增长至发电机额定电压即 21kV，发电机转速也将增长到额定转速，即 3000 转/分。

由此可以看出 SFC 装置向发电机定子输入电压量波动值是先增加达到平稳值，在下降至零，呈现为“几字形”。

在进行 SFC 装置在燃机仿真启动过程中，我们设定0参考电压值为 1500V， 29

K 参考电压要进行调试，直至逆变桥输出 2.6kV。经过不断调试，取得最佳 K 值为 1.4，逆变输出的交流电压为 2602V，基本达到稳态电压。结果见图 5.5。

图 5.5 2.6kV 交流电压输出

5.2 SFC 内部整流电路与逆变电路谐波分析

5.2.1 三相十二脉冲全控整流电路的谐波分析

1. 工作原理本课题研究的全控整流电路模拟的是燃气电厂的实际整流方式。燃气电厂一般采用的 SFC 装置系统包括整流器、逆变器以及电抗器，参数值分别为 12 脉冲、6 脉冲。故该课题在使用 Simulink 组件设计三相全控整流电路时，触发脉冲根据实际燃气电厂的触发脉冲值而定，即 12 脉冲。12 脉冲整流桥是指运用特定变压器将交流电进行对等划分为 6 脉冲，再通过直流电源串接，最终可形成 12 脉冲整流器。

以上 12 脉冲的形成看似是变压器和直流电源的作用，实则归功于谐波分量的变化。6 脉冲全桥整流包含了 6 个 SCR，由此对应着 6 个 switching impulse。

对于△-△变压器连接的 6 脉冲全控整流桥而言，在忽略三相桥式全控整流电路电流脉动和换相过程的前提下，假定脉冲触发角是 0，直流电感接近最大值，交流侧 reactance 等于 0，则交流侧电流傅里叶级数展开为：

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) - \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) - \frac{1}{17} \sin(17\omega t) + \dots \right] \quad (5-1)$$

由公式 (5-1) 可知：电流中各次谐波有章可循，可用通式 $6k \pm 1$ (k 为整数) 进行总结。

指 标
疑似剽窃文字表述
<div><div>1. 静止变频器的设备及工作原理</div><div>4.1 同步电机的变频调速原理同步发电机被用作同步电动机，</div><div>2. 转子绕组，形成一个静止的磁场，这两个磁场之间会在相互作用下产生磁力矩，使得转子也一同进行旋转，且频率和前面注入定子交流电的频率相同，</div><div>3. 旋转，整流后的励磁电流进入转子绕组后会产生旋转磁场，从而在定子上产生感应电动势，</div><div>4. 电路结构进行划分，静止变频器一共有直接静止变频器和间接静止变频器这两种类型。直接静止变频器的工作原理是将工作交流电直接转换为可控频率的交流电，</div><div>5. 条件如下：<div>a. 当晶闸管受到来自反向阳极的电压时，晶闸管将会处于一种反向阻断的状态，在这种状态下，晶闸管不管受到何种电压都将施加于门极。</div><div>b. 当晶闸管受到来自正向阳极的电压时，只有在正向电压施加于门极的条件下，晶闸管才会进行导通。正是因为在此时，晶闸管恰好处于一种正向导通的状态</div></div><div>6. 导通的情况下，一旦对其施加一定量的正向阳极电压，那么不管晶闸管的门极电压状态如何，晶闸管都会保持当前导通的状态。</div><div>7. $U=2.34U_{cos \alpha}$ 时，因此触发角度值发生了变化，最终能够获得研究中所需的直流电压幅值；在 Bus 电压采集模板的情况下，三相交流电压源可以对</div><div>8. 交流电，为了模拟真实的工作状况，将 Freq 频率值设定为工频 50Hz 的电压。当脉冲发生终止Block 端口的数值设置为 0</div><div>9. 30° 的差距，造成整流桥所流出的电压出现 12 次脉动的情况，而且是在同一个电源周期内，这也是 12 脉冲整流电路产生的原因。</div><div>10. 红线代表的转速基准值为 60 转/秒，蓝线代表的线电压基准值为 26kV。根据此曲线图，选取几个节点进行研究分析，</div><div>11. 1 燃机机组启动曲线节点分析序号时点 SFC 运行阶段发电机转速 r/min 发电机频率 Hz 定子线电压 k V</div><div>1 9:06:48 投运 0 0 0 2 9:07:10</div><div>持续提供定子电压 360 6 2.6 3 9:08:00</div><div>持续提供定子电压 1080 18 2.6 4 9:10:20</div><div>持续提供定子电压 2232 37.2 2.6</div><div>5 9:10:30 退出 2448 40.8 0</div><div>6 9:11:20 退出 3000 50 21</div><div>表</div><div>12. 节点如下：<div>上午 9:06:48，SFC 装置启动投运，此时发电机是电动机的运行状态。</div></div><div>13. 其主要原因在于 SFC 装置已停止向发电机定子供电，此时该装置已停止运行，发电机由燃机拖动运行，直至达到工频转速。</div><div>14. 发电机额定电压即 21kV，发电机转速也将增长到额定转速，即 3000 转/分。由此可以看出 SFC 装置向发电机定子输入电压</div></div>

15. 直至逆变桥输出 2.6kV。经过不断调试，取得最佳 K 值为1.4，逆变输出的交流电压为 2602V，基本达到稳态电压。结果见图 5.5。
图 5.5 2.6kV 交流电压输出
5
16. 2 SFC 内部整流电路与逆变电路谐波分析
5.2.1 三相十二脉冲全控整流电路的谐波分析
1. 工作原理本课题研究的全控整流电路
17. 组件设计三相全控整流电路时，触发脉冲根据
实际燃气电厂的触发脉冲值而定，即 12 脉冲。12 脉冲整流桥是
18. 谐波分量的变化。6 脉冲全桥整流包含了 6 个 SCR，由此对应着 6 个 switching impulse。

4. 008_第4部分		总字数：7612
相似文献列表		
去除本人文献复制比：33.8%(2574) 文字复制比：33.8%(2574) 疑似剽窃观点：(0)		
1	SFC装置在燃机启动过程中的Simulink可视化仿真 舒杨(导师：范春菊;毛建民) - 《上海交通大学硕士学位论文》- 2015-04-01	29.7% (2259) 是否引证：否
2	03100_1120312047 舒杨 舒杨 - 《学术论文联合比对库》- 2015-05-08	29.2% (2219) 是否引证：否
3	大容量燃机发电机组变频起动过程技术研究 陈德志(导师：徐余法;梁旭彪) - 《上海电机学院硕士学位论文》- 2020-05-24	3.7% (283) 是否引证：否
原文内容		

各次谐波的有效值与谐波次数也有着密切联系，运用数学术语表达为成反比，其与基波有效值的比值与谐波次数互为倒数。

图 5.6 6 脉冲整流器交流侧电压主要谐波分量示意图如下，其特征可描述为在一个正弦波（基波）周期内的波形叠加。

图 5.6 6 脉冲整流器交流侧电压主要谐波分量示意图同理，假定脉冲触发角是 0，直流电感接近最大值，交流侧 reactance 等于 0，则交流侧电流傅里叶级数展开为：

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \frac{1}{17} \sin 17\omega t + \dots \right] \quad (5-2)$$

由上述两个交流侧电流傅里叶级数展开式可知，2 倍数次及三倍数次谐波并未出现，这是由于电流脉冲呈现周期性特点，每周期的脉冲大小相等，方向相反，且电流脉冲宽度是 1/3 周期。谐波分量次数为 $6k \pm 1$ ，该谐波为 6 脉动整流桥交流侧的特征谐波。

12 脉冲整流器带有两个 6 脉冲桥，两个 6 脉冲桥作用不一。另外，由于谐波具有奇数次相消的特性，故有：

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \frac{1}{23} \sin 23\omega t + \frac{1}{25} \sin 25\omega t + \dots \right] \quad (5-3)$$

图 5.7 给出 12 脉冲整流器产生的交流侧电压主要谐波分量，其通式为 $12k \pm 1$ 31 次，在一个正弦波（基波）周期内的波形叠加。

图 5.7 12 脉冲整流器交流侧电压主要谐波分量示意图根据电压波形的傅里叶分析可知：

- 1、它含有的谐波为 $6k$ 次。
- 2、有效的谐波电压幅值在固定运行范围内随意波动，当达到一定值时（约 90° ）会产生异于较小值的较高幅谐波。

图 5.8 6 脉冲整流器直流侧电压谐波波动示意图在 6 脉冲整流桥双极系统中，整流桥变压器分别接成角角和角星的形式，使得相位移动 30° ，因此交流母线上的低次谐波具有相抵消的特性。

由直流端产生的谐波电压波动具体见图 5.9。

图 5.9 12 脉冲整流器直流侧电压主要谐波分量示意图每个 6 脉波整流桥的特征谐波电压和理想直流空载电压与 12 脉冲相应电压 32

具有一定的数值关系，故总特征谐波电压与总理想空载电压与单个 6 脉波整流桥也就有密切关系。

2. Simulink 仿真谐波分析下面用 Simulink 中的工具 FFT 对三相十二脉冲全控整流电路模型整流前后的电流进行谐波分析。该算法通过抓住离散傅氏变换的奇、偶、虚、实等特性进行快速计算。

图 5.10 6 脉冲整流器交流侧电压主要谐波分量仿真示意图图 5.10 中将 6 脉冲整流器交流侧电压作为此次研究所选择的
研究对象，这种电压即经由三相三绕组类型的变压仪器所产生的电压，它的有效数值具体是
1449.86 伏。右侧给出的相关柱状图对于这一交流正弦波当中存在的关键性谐波
分量作出了极为直观地展示。

在这个柱状图当中，横轴用来表示 0~40 次范围内的谐波频次，纵轴用来表示各不同次数的谐波分量在总体基波分量中所
占的比例。基波的幅值大小为
2050 伏，是经过 1449.86 有效值大小乘 $\sqrt{2}$ 的运算过程后算出的。明显可知，除了
幅值大小最高的相关基波（1 次）之外，其他的谐波次数都是 5、7、11、13、17、
19、23、……等等，符合分析相关原理过程中的包含 $6k \pm 1$ 次谐波类型，除此之
外，谐波的次数高低和它的有效数值之间存在负相关关系。THD 总谐波存在 4.44%
的失真比例大小，在相关的电力系统当中，某种次 harmonic 所具有的谐波数量
指的是这个次 harmonic 和相关的 fundamental harmonic 之间 RMS 的比例。这种
proportion（比例）和全部 harmonic 的 RMS 的根与开方都被叫做总谐波的失真问题。 33

图 5.11 12 脉冲整流器交流侧电压主额的关键谐波分量的仿真图表图 5.11 中将相关的三相绕组变压器高压侧 A 相电流
作为研究所选取的研究对象，这种电流指的是 2 个六脉冲整流桥交流侧类型电流的总和通过变压仪器发生高压侧变换之后产生
的相关结果。在上图给出的相关柱状图当中，横轴用来表示 0~40 次范围内的谐波频次，纵轴用来表示各不同次数的谐波分量
在总体基波分量中所占的比例。基波具有 47.96A 的幅值大小。明显可知，除了幅值水平最大的基波（1 次）以外，其余的高
频次谐波都是 11、13、23、25、35、37……

等等，符合分析原理过程当中的包含 $12k \pm 1$ 次类型的谐波，除此之外，谐波的次数高低和它的有效数值之间存在负相关
关系。THD 总谐波存在比例为 14.22% 的失真性。

图 5.12 6 脉冲整流器直流侧型电压关键谐波分量的仿真图表图 5.12 中将相关的三相六脉冲整流桥输出的直流类型电压
作为研究所选择的研究对象，在上面给出的柱状图当中，横轴表示的是次数为 0 到 40 的谐波次 34

数区间，纵轴表示的是各不同次数的谐波分量在总体基波分量中所占的比例。基波具有 1953V 的幅值大小。可以明显得知
，高频次等谐波依次是 6、12、18、24、

30、36……等等，符合分析原理过程当中含 $6k$ 次的相关谐波，除此之外，谐波
的次数高低和它的有效数值之间存在负相关关系。THD 总谐波存在比例为 8.17%
的失真性。上述仿真类型的相关结果是在触发角处于 0° 的状态之下获得的。

表 5.2 三相桥式 6 脉冲整流电路输出的直流型电压的谐波状况触发角 ($^\circ$) 输出直流电压 (V) THD (%) 0 1953 8.17
30 1688 27.14 45 1377 50.83 60 966.1 78.25 80 328.9 263.69

表 5.2 显示的是触发角处在不相同的情况时，相关的三相桥式六脉冲整流电路输出的直流电压存在的谐波情况，经过比较
分析，可明显得知具体的仿真结果和上文当中展开的相关原理分析是绝对吻合的，也就是说谐波的有效幅值大小在
的运行区间当中大规模地发生改变，当运行状况近似于 90° 的时候，会产生比
运行在更低值状态时幅值更大的相关谐波。

图 5.13 12 脉冲整流器直流侧电压关键谐波分量的仿真图表图 5.13 中将相关的三相 12 脉冲整流桥输出的直流型电压作
为研究所选择的对象，这种电压就是 2 个 6 脉冲整流桥类型的直流侧电压的总和。在上面给出的柱状图当中，横轴用来表示
0~40 次范围内的谐波频次，纵轴用来表示各不同次数的谐波分量在总体基波分量中所占的比例。基波存在大小为 3906V 的幅
值。

明显可知，高频次的谐波主要是 12、24、36……等等，符合分析原理过程当中的含有 $12k$ 次的谐波类型，除此之外，谐
波的次数高低和它的有效数值之间存在 35

负相关关系。THD 总谐波存在比例为 5.09% 的失真行性，上述相关的仿真结果是当触发角处于 0° 状况之下所获得的。

表 5.3 三相桥式 12 脉冲整流电路输出直流型电压滤波前后的 THD 与幅值对比图表触发角 ($^\circ$)
输出直流电压

(V)
THD (%)
滤波后直流电压
(V)
滤波后 THD (%) 0 3906 5.09 3459 3.57 30 3374 14.7 2920 3.81 45 2752 24.08 2265 4.28 60 1931 39.15 1256
6.27 80 656.8 131.56 197.6 1.78

表 5.3 显示的是触发角处在不相同的情况时，分析了三相桥式 12 脉冲整流桥输出直流类型电压滤波时的前后谐波情况
，经过比较分析之后，明显可知具体的仿真结果和上文当中进行的原理分析是绝对吻合的，也就是说谐波幅值的有效值在的运
行区间之中发生着大规模地改变，当运行状况近似于 90° 的时候，会产生比运行在更低值状态时幅值更大的相关谐波，此外还
能够明显地发觉，在通过 LC 类型的滤波电路之后，将会一定程度地降低相关的 THD 值，这意味着滤波设备在很大程度上降低
了整流之后直流电压当中所包含的谐波。

5.2.3 三相桥式 PWM 型逆变电路的谐波分析根据图 5.14 可明显得知，经过整流之后的直流电会流入相关的三相桥式全控
逆变桥，而逆变流出之后的交流电流会通过相关的 LC Filter。LC Filter 部件发挥着滤波器的作用，由于流经相关的 PWM 逆
变桥将会最终流出脉冲矩类型的电波，而流经相关的 LC Filter 滤波之后就产生了理想状态中的正弦型电波，此外它还可以形
成更为平缓的波形，减少谐波。

图 5.14 逆变桥输出 PWM 波形与滤波后的波形 36
有由图 5.14 可明显得知，上述 PWM 矩形波通过收集逆变桥部件流出的相
关 AB 相类型的线电压，再流经相关的 LC Filter 后进行第二次收集，由此才获得
一个理想中的比较平缓的正弦波。

图 5.15 与 5.16 分析了 PWM 波形以及滤波之后的正弦波具有的谐波状况。

图 5.15 逆变桥输出 PWM 类型波形的谐波情况分析图从图 5.15 可以看出, PWM 矩形波具有大小为 463.4V 的幅值, THD 的具体比例大小是 294.96%, 高频次的谐波次数是 3、4、6、11、……等等。 37

图 5.16 PWM 波滤波后的谐波分析从图 5.16 中可以看出, PWM 波具有大小为 141.4V 的幅值, THD 的具体比例大小为 3.72%, 高频次的谐波次数表现为 3、4、6。

在比较分析滤波前后的谐波状况之后可以得知, LCFILTER 设备不但可以使得相关的 PWM 矩形波更为平缓, 此外还可以将绝大多数的高频次谐波分量进行有效过滤, 由此很好地对 THD 进行控制, 获得质量水平很高的交流电类型。

5.3 SFC 在燃机启动过程中的谐波分析

5.3.1 SFC 装置注入发电机定子电压的仿真谐波分析在 5.2 这一章当中, 已经成功观察到了相关的 SFC 启动曲线图, 并且细致地分析了变频类型电动机当中定子电压大小和频率高低方面发生的变动, 基于上述观察结果, 能够更加方便地对 SFC 设备注入发电机当中的定子电压的谐波情况进行研究分析。

表 5.4 燃机设备启动曲线节点分析序号时间 SFC 运行阶段
发电机转速

r/min

发电机频率 Hz 定子线电压

1 9:06:48 投运 0 0 0 2 9:07:10

持续提供定子电压 360 6 2.6 38 3 9:08:00

持续提供定子电压 1080 18 2.6 4 9:10:20

持续提供定子电压 2232 37.2 2.6

5 9:10:30 退出 2448 40.8 0

6 9:11:20 退出 3000 50 21

通过 Simulink 逆变电路的模拟仿真过程之后, 给出了相关的谐波情况:

(1) 在发电机处于 2232 转每分的转速状态时, 定子存在 2.6 千伏的电压大小, 经过滤波后的 THD=大小为 66.59%。

(2) 在发电机处于 1080 转每分的转速状态时, 定子存在 2.6 千伏的电压大小, 经过滤波后的 THD 大小为 52.01%。

(3) 在发电机处于 360 转每分的转速状态时, 定子存在 2.6 千伏的电压大小, 经过滤波之后的 THD 大小为 131.18%。

经过上述研究分析之后可知, 在相关的 SFC 设备产生稳定的交流电压幅值大小时, 改变频率大小将会导致总谐波的失真率发生相应改变。此外在这一仿真电路当中, 只要流经了相关的 LC 滤波器, 都会降低总谐波的失真率。

5.3.2 SFC 装置在燃机启动过程中谐波危害的控制面对谐波分量造成的不利影响, 除去安装常见的消谐设备之外, 还可以通过别的辅助方法来降低设备在运转过程中遭受的来自高频次谐波的干扰, 下面对于各种有效预防办法进行了总结:

(1) SFC 系统在运行的过程中会出现较多的高次谐波, 因为大多数的 SFC

系统的 I/O 信号都是与光电型变送器直接相连然后就可以和燃机控制系统通过远距离通讯, 所以对电缆的防干扰性能要求比较高。有的时候在对 SFC 系统进行调试时会出现很多的干扰而出现这些干扰的主要原因就是 SFC 装置所使用的控制电缆没有较好的屏蔽作用。所以为了减少干扰的出现, 常常会在 SFC 装置的输出中间继电路上并联滤波电容, 但是常常会忽略掉应该在 SFC 的输入口上做好避免干扰的措施。许多笔者认为, 应尽可能地将 SFC 系统电缆替换成屏蔽电缆, 并且在远程电缆的输入一端装上中间继电器, 借此避免干扰信号的产生而引起 SFC 装置出现故障。

(2) 因为 SFC 装置在使用的时候会出现谐波, 这导致厂用电 6KV 受到其影响并引发很多电气设备继保装置的动作产生一系列的异常。SFC 装置所产生的谐波会使产用电的电压波形变成畸形, 电压波形一旦改变紧接着给泵开关一侧以及马达中性点的电流互感器均会发生变化, 由于这两个电流互感器的暂态特性并 39

不完全一致, 就容易造成二次差流的产生。若想改变这种状况, 可以在施工允许的情况下适当增加继保装置的值。根据这些状况总结, 在装备 SFC 系统燃气轮机电厂, 为其选择合适的电流互感器时, 应该根据该电动机是否有差动保护, 尽量在有的前提下选择同一个厂家提供的同型号电流互感器, 并且加大互感器的额定二次负载容量, 以尽可能的避免二次电流出现。

5.4 本章小结本章的主要内容在结合整流以及逆变前后在 SFC 装置启动以后的电压波形变化对谐波进行研究和模拟仿真, 使 Simulink 可视化仿真能够在燃机开始启动的时候实现, 也就是说, 整流和逆变的时候出现的谐波分量的产生特性以及消除这种谐波的装置的具体效果能够在模拟的电路中完美的呈现现在我们眼前, 这种仿真模拟所得到的可变幅值、频率的交变电流可以做到根据不同转速输入燃机所需要的定子输入电压, 并对现实操作使用 SFC 装置的过程中由于谐波的产生可能对设备具有损坏及相对应的抑制手段进行了探讨。 40

第 6 章总结与展望

6.1 论文总结近年来我国经济发展速度不断加快, 科技水平稳步上升, 变频器的性能与以前相比也明显加强, 并且研究开发技术也相较以前提高很多。因为有越来越多的节能装置被使用, 所以风机水泵及变压器抗压能力增强, 都会对改善变频器性能起到推进的作用, 让其出现异常的可能性大大降低。在改改变变频器的变化过程中,

电厂能够依照多个方面例如变频器的特征、功能、控制方法等, 来进行筛选, 结合电厂的情况, 选出最为恰当的方案, 针对在燃机启动中 SFC 装置进行 Simulink

可视化仿真, 以此来提高工作质量和效率, 并且达成了下列科研成就:

(1) 说明了发电机为何能成为电动机状态运行的前提。就目前我国电力产业而言, 为了回应政府开发清洁能源以及调整能源结构的政策, 其重点是燃气轮机组发电。其中最大的特点就是在燃机运作的过程中加入了 SFC (静止变频器),

这种变频器可以和输入励磁电流的转子相互作用, 并且在装置启动的时候注入可变频率的交流电压, 使之与发电机同时进行变为变频电动机转动, 通过以上步骤来带动燃机, 直到自持转速, 然后才会退出。

(2) 对 SFC (静止变频器) 装置的相关工作原理和设备组成进行了简要介绍。在燃气轮机启动的时候, 发电机的出口断路器会位于断开位置, 接着频率恒定和电压恒定的供电系统给 SFC (静止变频器) 提供电功率, 并且提供变频变压的电功率给同步电动机, 使得在燃机启动过程中同步发电机变为变频电动机转动。

最后达到燃气轮机的“软”启动过程，即从零开始。

(3) 应用 Simulink 系统构建一个 SFC (静止变频器) 内部设备的仿真模型。

该模型框架是“整流桥-逆变桥”的基础上的设计思路，采取 6kV 厂用电工频交流电压为模拟电厂实际运行时接入，经过的变压器为三相三绕组，得到的三相交流电为 1.45kV 的两组线电压，之后再将这两组的交流电依次通过两个六脉冲全控整流桥，其中的两组六脉冲分别由十二脉冲的发生器来提供，最后经过整流，将整流后的直流电压串联起来，即能得要想要的直流电压。利用上述直流电压经过一个阻感负载（经过对比了仿真过程中纯电阻负载与阻感负载的差别），再将串接电容串接，即形成了一个 LC 滤波器，最后平整电源输出的直流电波形。

(4) 为了使 SFC (静止变频器) 仿真模型具有的实用性，可以通过观察 SFC

(静止变频器) 装置的曲线图，根据曲线图中的 SFC (静止变频器) 装置的每一

个时段的运行状态来制作表格，通过对比分析表格中 SFC (静止变频器) 装置中的若干关键节点，接着注入发电机的可变频率和交流电压，然后根据设定的仿真模型参数进行反复试验，最后准确地模拟出与 SFC (静止变频器) 装置一致的电

压输出的结果。经过仿真模型对 SFC (静止变频器) 装置进行相应的谐波分析，

其中包含了逆变过程的前后整流过程的前后和滤波器工作前后的谐波分量变化，

得出的分析结论与其原理基本一致，这都证实了仿真模型具有一定的正确性。

6.2 论文展望由于本文在撰写过程中时间较短，加上能力有限，文章虽然整体结构和内容已经构建，但是不完善的地方依然存在，分析认为以下工作需要在后续继续开展：

(1) 大量谐波会存在于大容量静止变频器启动过程中，尤其是在整流侧更容易出现，这种情况的存在会给电网带来较为严重的危害，因此需要采取合适的抑制谐波方式，这需要在后续进行研究。

(2) 在研究静止变频调速系统的过程中，由于构建传递函数需要用到的变量较多，为了计算和公式推导的方便，对这些变量做了一定的简化处理，这种处理方式可能会对控制系统产生一定的影响，在以后的研究中，可能需要对这方面进行优化，以提高控制器的性能。

参考文献

- [1] 刘明行, 赵玉, 项立铮. 燃气轮机发电机组静止变频启动装置研究[J]. 能源研究与信息, 2006, 22(2): 98-102.
- [2] Magsaysay G, Schuette T, Fostiak R J. Use of a static frequency converter for rapid load response in pumped-storage plants[J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 1995, 10(4): 694-699.
- [3] 刘凯, 赵焱, 张弛. 燃气轮发电机组 SFC 系统调试[J]. 华北电力技术, 2013(7): 44-45.
- [4] 王晶晶, 胡伟, 王露, 等. 燃气轮发电机静态变频系统调试方法及启动特性初探[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(2).
- [5] Static frequency converter for producing a constant output frequency from a variable frequency input: U.S. Patent 3,287,622[P]. 1966-11-22.
- [6] 王亚婧, 徐春建, 朱宏超, 等. 燃气轮机组励磁系统设计与应用[J]. 电气技术, 2013, 14(07): 60-63.
- [7] Singh B, Bhuvaneswari G, Garg V. Harmonic mitigation using 12-pulse AC-DC converter in vector-controlled induction motor drives[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2006, 21(3): 1483-1492.
- [8] Ryu H S, Kim B S, Lee J H, et al. A study of synchronous motor drive using static frequency converter[C]//Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International. IEEE, 2006: 1496-1499.
- [9] 牛勇. 惠州 LNG 电厂 PT 消谐装置在静态变频系统 (SFC) 中的应用[D]. 华南理工大学, 2012.
- [10] Singh B, Bhuvaneswari G, Garg V, et al. Pulse multiplication in AC-DC converters for harmonic mitigation in vector-controlled induction motor drives[J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2006, 21(2): 342-352.
- [11] 易成功. 抽水蓄能电站静止变频器 (SFC) 工作原理分析[J]. 抽水蓄能电站工程建设文集 2013, 2013.
- [12] 黄彦庆. 静态变频器 (SFC) 及其原理[J]. 水电站机电技术, 2012, 25 (2): 4-8.
- [13] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术. 机械工业出版社. 2006 第 4 版.
- [14] 阮伟. 静态变频器 (SFC) 在燃机电厂的应用[J]. 电气开关, 2007, 45(2): 48-50.
- [15] 鲁勇勤, 况明伟, 李宇俊, 等. 燃机变频启动系统技术引进和创新开发设计[J]. 东方电气评论, 2009, 23(4): 43-48.
- [16] Liserre M, Dell'Aquila A, Blaabjerg F. Stability improvements of an LCL-filter based three-phase active rectifier[C]//Power Electronics Specialists Conference, 2002. PESC 02. 2002 IEEE 33rd Annual. IEEE, 2002, 3: 1195-1201.
- [17] Singh B, Bhuvaneswari G, Garg V, et al. Pulse multiplication in AC-DC converters for harmonic mitigation in vector-controlled induction motor drives[J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2006, 21(2): 342-352.
- [18] 易成功. 抽水蓄能电站静止变频器 (SFC) 工作原理分析[J]. 抽水蓄能电站工程建设文集, 2013.

[19] 冯志兵,金红光. 燃气轮机冷热电联产系统与蓄能变工况特性[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 25-30.

[20] 李锋,赵玺灵,付林. 燃气轮机热电联供系统性能评估案例[J]. 热能动力工程, 2010, 25(1): 34-38.

[21] 忻奇峰. 燃气轮机热电联产系统的应用和完善[J]. 热力发电, 2005(1): 4- 8.

[22] 苏玲,张建华,苗唯时,等. 微型燃气轮机微网控制策略[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 513-518.

[23] Lee B K, Ehsami M. A simplified functional simulation model for three-phase voltage-source inverter using switching function concept[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2001, 48(2): 309-321.

[24] 田立军,陆于平. 抽水蓄能机组微机保护的频率自适应[J]. 电网技术, 1997, 21(7): 39-43.

[25] 汪军,方辉钦,张红芳,等. 抽水蓄能电站控制与发电机的国产化[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28(3): 1-3.

[26] 周军. 抽水蓄能电站中 SFC 变频启动的若干特点[J]. 电力自动化设备, 2005, 24(11): 99-101.

[27] 阮伟. 大型燃机变频调速系统的运行及控制特点[J]. 电力建设, 2008, 29(2): 88-89.

[28] 王晶晶,郭鑫,侯小龙,等. 燃气轮发电机静态变频启动若干问题分析[J]. 中国电力, 2008, 41(11): 47-50. 44

[29]杨金辉. 数字化 PWM 逆变系统控制关键技术研究及其应用 [J]. 博士论文, 湖南大学, 长沙, 2010.

[30] Kumar K V, Michael P A, John J P, et al. Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverter[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, 5(7): 61-74.

[31] 李志刚. 9F 燃气轮机 SFC 启动系统及启动过程简介[J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(2): 57-61.

[32] 林幼晖. 惠州天然气电厂电气设计特点探讨[J]. 电力建设, 2004, 25(8): 12-14.

[33] 张俊武,王新,金宏彬,等. 同步电动机变频启动控制系统[J]. 控制工程, 2012, 9(5): 93-94.

[34] 段立强,林汝谋,蔡睿贤,等. 整体煤气化联合循环(IGCC)[J]. 燃气轮机技术, 2000, 13(1): 9-17.

[35] Nengling Tai, Xianggen Yin, Deshu Chen. Analysis of Stator Ground Protection Schemes for Hydro-Generator of Three Gorges Power Plant Based on Zero Sequence Voltage[C]//Singapore: 2000, 1. IEEE Winter Meeting.

[36] Rifaat, R. M. Considerations for generator ground fault protection in midsize cogeneration plants[C]//Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. 2005. pp: 175

指 标
疑似剽窃文字表述
<div>1. 谐波分量次数为 $6k \pm 1$, 该谐波为 6 脉动整流桥交流侧的特征谐波。 12 脉冲整流器带有两个 6 脉冲桥,</div> <div>2. 具体见图 5.9。 图 5.9 12 脉冲整流器直流侧电压主要谐波分量示意图每个</div> <div>3. 进行快速计算。 图 5.10 6 脉冲整流器交流侧电压主要谐波分量仿真示意图图</div> <div>4. harmonic 和相关的 fundamental harmonic 之间 RMS 的比例。</div> <div>5. 谐波存在比例为 8.17% 的失真性。上述仿真类型的相关结果是在触发角处于 0° 的状态之下获得的。</div> <div>6. 脉冲整流桥类型的直流侧电压的总和。在上面给出的柱状图当中, 横轴用来表示 $0 \sim 40$ 次范围内的谐波频次, 纵轴用来表示各不同次数的谐波分量在总体基波分量中所占的比例。基波存在大小为 3906V</div> <div>7. 谐波存在比例为 5.09%的失真行性, 上述相关的仿真结果是当触发角处于 0° 状况之下所获得的。</div> <div>8. 三相桥式全控逆变桥, 而逆变流出之后的交流电流会通过相关的 LC Filter。LC Filter</div> <div>9. PWM 波形以及滤波之后的正弦波具有的谐波状况。 图 5.15 逆变桥输出 PWM</div> <div>10. 3、4、6 。 在比较分析滤波前后的谐波状况之后可以得知, LCFilter 设备不但可以使得相关的 PWM 矩形波更为平缓,</div> <div>11. 3 SFC 在燃机启动过程中的谐波分析 5.3.1 SFC 装置注入发电机定子电压的仿真谐波分析在</div> <div>12. 将这两组的交流电依次通过两个六脉冲全控整流桥, 其中的两组六脉冲分别由十二脉冲的发生器来提供, 最后经过整流, 将 整流后的直流电压串联起来, 即能得要想要的直流电压。</div>

说明: 1. 总文字复制比: 被检测论文总重合字数在总字数中所占的比例

2. 去除引用文献复制比: 去除系统识别为引用的文献后, 计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

3. 去除本人文献复制比：去除作者本人文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例
4. 单篇最大文字复制比：被检测文献与所有相似文献比对后，重合字数占总字数的比例最大的那一篇文献的文字复制比
5. 指标是由系统根据《学术论文不端行为的界定标准》自动生成的
6. 红色文字表示文字复制部分；绿色文字表示引用部分；棕灰色文字表示作者本人文献部分
7. 本报告单仅对您所选择比对资源范围内检测结果负责



 amlc@cnki.net

 <http://check.cnki.net/>

 <http://e.weibo.com/u/3194559873/>

研究生学位论文 (TMLC)