

硕士学位论文

题 目: 基于键合图方法的风力发电系统建模研究

英文题目: <u>Research on Modeling of Wind Power Generation</u> <u>System Based on Bond Graph Method</u>

姓 名	朱贵杰	学 号	11109014
所在学院	工学院	导师姓名	范 衠
专 业		机械电子工程	
入学日期	2011年9月	答辩日期	2014年5月

学位论文原创性声明

本论文是我个人在导师指导下进行的工作研究及取得的研究成果。论文 中除了特别加以标注和致谢的地方外,不包含其他人或其它机构已经发表或 撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体,均已在论文中以 明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律责任由本人承担。

作者签名: 年来手 日期: 2014 年 5月 20日

学位论文使用授权声明

本人授权汕头大学保存本学位论文的电子和纸质文档,允许论文被查阅 和借阅;学校可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、缩印或其它复制手段保存和汇编论文;学校并可以向国家有 关部门或机构送交论文并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的全部或 部分内容。对于保密的论文,按照保密的有关规定和程序处理。

本论文属于:保密(),在 年解密后适用本授权声明。

不保密 (↓)。(请在以上括号内打"√")

作者签名: <u><u></u> 日期: <u>2014</u>年<u>5月20日</u>日期: <u>2014年5月20日</u></u>

摘要

风力发电系统将风轮捕获的风能转变为机械能,经传动系统的传递,最终转变为电能, 是一种特殊的多能域耦合的复杂系统,其涉及风力、机械、电力、液压及控制等多学科领 域的知识。目前,对风电系统的研究大多从局部出发,按系统中各子部件所属学科领域建 立各自的数学模型,但各物理系统的异质性容易导致数学模型的异构性,且建模过程比较 复杂,极易出错,不便于全面分析风电系统的动态特性。因此建立合理而正确的风力发电 系统动力学模型,对风电系统内在动态特性的研究和系统的设计都具有十分重要的意义。

键合图方法是一种从动力学观点出发的、多能域并存的系统动力学建模统一化方法, 能够有效解决涉及多能域耦合的复杂系统的动态分析与建模问题。本文将键合图方法应用 于风力发电系统的分析中,提出了一种基于键合图的风力发电系统建模方法,利用该方法 对系统进行了如下内容的研究:

首先介绍了键合图方法的基本理论;接着,在深入分析风电传动系统的结构组成的基础上,对传动系统键合图模型的建立进行了详细研究,利用 20-sim 软件分析了齿轮箱的振动响应,并利用键合图模态分析法对传动系统进行了模态分析;然后,根据异步发电机的等效电路,对笼型异步发电机的键合图模型进行了重点探讨,建立了任意旋转坐标系下的笼型异步电机的键合图模型,并利用 20-sim 仿真平台对其运行特性进行了仿真分析;最后,对风轮、变桨机构和塔架等子系统进行了键合图描述,结合传动系统和发电机系统的键合图模型,探讨了整个风力发电系统的键合图模型的建立。

本文不仅为键合图方法在电力电子系统中的建模研究拓宽了视野,也为键合图在风电系统中的建模提供了依据,并为进一步完善风电系统的键合图模型打下了坚实的基础。

关键词:风力发电系统;齿轮箱;笼型异步发电机;键合图方法

Abstract

Wind power generation system converts the wind energy which is captured by wind turbine into mechanical energy, then converts into electrical energy by drive system. It is a special multi-energy domains complex system, which involves many fields, like wind power, mechanics, electrical, hydraulic and control. Recent studies have shown that wind power systems established their mathematical models according to each sub-component system. However, the isomerism of physical system easily lead to the inhomogeneity of mathematics, the modeling process is very complex and liable to make mistakes. Result in difficultly analyzing its dynamic characteristics. So building a reasonable and correct kinetic model of wind power system is meaningful for designing the system and investigating its inherent dynamic characteristics.

The bond graph method, which contains multi-energy domains based on the viewpoint of dynamics, can build the dynamics system uniformly and effectively solve the dynamic analysis and modeling problems of multi-energy coupling complex system. In this study, the bond graph method is applied to the wind power generation system analysis, based on bond graph a modeling method of wind power generation system is presented, and the following contents are studied based on the method:

Firstly, the basic theory of bond graph method is introduced. Then, based on analyzing the structure of the wind power drive system, the establishment of its bond graph model is investigated in detail, the vibration response of gearbox is analyzed on the 20-sim software, and the modal analysis of drive system is carried out. Furthermore, the bond graph model of cage induction generator is mainly discussed according to the equivalent circuit of induction generator, the bond graph model under the arbitrary rotating coordinate system is built and the operating characteristic is investigated on the 20-sim software. Finally, the models of subsystems, such as wind rotor, pitch-regulated mechanism and tower ect, are described based on bond graph method, and combining with the bond graph of the drive train and generator system, the building of bond graph model of the whole wind power system is explored.

Based on bond graph the modeling research of power electronics is widened out and the feasibility of bond graph using in wind power system modeling is provided. More importantly, a solid foundation for further improving of the bond graph model of wind power system is laid.

Keywords: wind power system; gearbox; cage induction generator; bond graph method

目 录

摘	要	I
Abs	trac	t
目	录	
第1	章	绪论1
	1.1	选题背景及意义1
	1.2	键合图方法在风电相关领域的研究现状2
		1.2.1 国外研究现状
		1.2.2 国内研究现状
	1.3	风力发电系统建模框架5
	1.4	本文主要研究内容及结构安排6
第 2	章	键合图方法的基本理论知识7
	2.1	键合图基本概念7
		2.1.1 键合图常用术语7
		2.1.2 广义变量
	2.2	键合图基本元件
		2.2.1 一通口元件10
		2.2.2 二通口元件10
		2.2.3 多通口元件11
	2.3	元件的因果关系12
	2.4	键合图建模13
		2.4.1 电系统
		2.4.2 机械平移运动系统14
		2.4.3 机械定轴转动系统14
	2.5	由键合图模型列写状态方程14
		2.5.1 键合图的增广14
		2.5.2 列写状态方程的基本步骤15
	2.6	本章小结16

第3章风力	7机传动系统的键合图建模分析	17
3.1 风之	力机传动系统模型	17
3.2 风;	力机传动系统的键合图建模	19
3.2	2.1 低速轴侧模型	19
3.2	2.2 高速轴侧模型	20
3.2	2.3 齿轮箱键合图模型	21
3.2	2.4 传动系统的键合图模型	24
3.3 齿车	论箱的仿真分析	25
3.4 传动	动系统的模态分析	27
3.4	4.1 键合图模态分析法	27
3.4	4.2 固有频率和对应振型	28
3.4	I.3 行星齿轮系的位移模态	33
3.5 本主	章小结	34
第4章 笼型	望异步发电机的键合图建模分析	35
4.1 三材	相异步发电机的物理模型	35
4.2 坐林	示变换和变换矩阵的键合图模型	36
4.2	2.1 坐标变换	37
4.2	2.2 变换矩阵的键合图模型	40
4.3 笼垫	型异步发电机键合图模型	43
4.3	3.1 笼型异步发电机键合图模型	43
4.3	3.2 由键合图模型列写电机数学模型	47
4.4 笼罩	型异步电机仿真分析	49
4.4	H.1 电机空载启动空载运行时的仿真	49
4.4	1.2 电机空载启动负载突变运行时的仿真	50
4.5 本重	章小结	53
第5章 风力	7发电系统的键合图模型	54
5.1 其作	也子系统的键合图模型	54
5.1	.1 风轮气动键合图模型	54
5.1	.2 变桨机构的键合图模型	58
5.1	.3 对比验证	58

	5.	5.1.4 塔架的键合图模型	60
	5.	5.1.5 电网侧键合图模型	62
	5.2 系	系统的键合图模型	62
	5.3 本	5 章小结	64
总结	与展望	<u></u>	65
	总结		65
	展望		66
参考	文献		67
致	谢		71
攻读	硕士学	学位期间主要的工作成果	72
个人	简历		73

第1章 绪论

1.1 选题背景及意义

随着社会的快速发展,工业化进程的加速,能源与环境问题已成为当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题,为了解决常规能源短缺的问题,可再生能源的开发和利用越来越受到各国的高度重视。风能作为一种取之不尽、用之不竭的清洁能源,风力发电又作为目前最具规模化开发和商业化发展前景的新能源发电技术,已成为全球发展最快的可再生能源^[1]。发展风力发电,不仅可以节约常规能源,而且有利于环保,是改善能源结构,减少环境污染的有效途径之一,可带来直接的经济效益、社会效益和环境效益。

风力发电系统的运行过程是一个多因素相互耦合的过程,涉及到空气动力学、结构动 力学、传动链动力学、电机动力学以及控制等因素,其系统动力学特性包括风场的动态特 性、风轮的空气动力学特性、风力机结构动力学特性以及电机特性等。风电系统的目标是 达到最佳运行性能,即在稳定运行时,尽可能多的捕获风能并转换为电能。为获得高产、 高质量的电能,需要研究风电系统的整体动态特性,从而建立合理而正确的风力发电系统 全局动力学模型,将是首要解决的问题,也是一项具有挑战,且富有实际意义的工作。

由于实际工程系统的复杂性和多样性,一个系统不仅仅涉及单一能量范畴,而是由多 种能量范畴耦合而成的。现有的各种系统动力学分析方法,往往针对于单一能量系统,对 多能域耦合的工程系统,具有局限性。很明显的,风力发电系统就是一个多能域耦合的复 杂系统,其涉及了风、机械、液压、电磁等多种能量形式,但对它的研究大多从局部出发, 即对组成系统的各个部件(如风轮、传动链、发电机等),按它们所属的学科领域的建模 方法建立各自的数学模型,难以获得系统的全局动力学模型,对各数学模型的求解也只能 体现系统的局部特性。如对风轮利用空气动力学知识建立其气动模型分析气动特性;对传 动链利用转子动力学知识建立运动方程分析其扭转特性;对发电机利用电机动力学建立电 压、磁链、运动方程分析其运行特性等等。为使风电系统正常运行,还将利用控制领域的 知识,建立控制系统的方程,实现风机的相关控制。然而,即使将所建模型拼装成统一方 程,继而转换为状态方程,这在技术上也将十分烦琐困难,且极易导致关联变量的产生和 模态的丢失。

基于上述背景和存在的问题,本文采用键合图方法对风力发电系统进行建模研究。由 于风电系统是一个复杂的涉及到多种能量形式的工程系统,中间涉及了能量的转化和传 递,而键合图方法是一种适合于多能量系统的建模方法,在多种能量形式并存的工程系统

建模中有其独特的优势,且在键合图模型中可以直观地看出元件与子系统之间的因果关系和功率流,从而非常有效地揭露了某些系统属性和内在特征。如图 1-1 所示,键合图理论可通过与实际物体或等效电路的一一对应关系使机电系统的建模过程大大简化明了^[2],同时其利用各实际物体部件之间的相互作用关系建模,可以方便明确的表示出能量的流向、 消耗和传递过程。



图 1-1 动态系统的键合图描述

Fig.1-1 Bond graph representation of the dynamic system

因此,利用键合图方法对风力发电系统进行建模研究,是可行的,并有助于分析风电 系统内部的一些动态特性,建立完备的风力发电系统键合图模型具有较高的理论意义和工 程应用价值,并可以为风力机的设计及其控制研究打下基础。

1.2 键合图方法在风电相关领域的研究现状

键合图(bond graph)方法是 1959年由美国麻省理工学院H.M.Paynter教授所提出的^[3], 后经由D.C.Karnopp^[4]、A.Y.Orbak^[5]等将其逐步发展完善和推广,是一种基于系统动力学的, 能有效解决多能域并存复杂系统的动态分析和建模的统一化方法^[3,6]。与其他系统动力学方 法相比较,键合图方法具有许多优点和独到之处^[7]:①各能源间符号和概念的高度统一性; ②模型的高度规范性;③抽象和具象的统一性;④对称性。经过半个多世纪的不断发展和 完善,其基础理论已相当成熟,目前已在机械(力学)、电磁学、液压、热力学、生物学、 生理学、化学等工程技术领域的动态分析及控制研究中得到了广泛的应用。

风力发电系统是由风力机(风轮、塔架)、高速轴、齿轮箱、低速轴、励磁装置(主要由电力电子设备组成)、发电机及其一些相关控制系统等多个子部件或子系统组成的复杂系统。传统的研究方法中,大多都是对系统中的各个部件进行建模,再进一步探讨其动态特性。而鉴于键合图比之其他动力学建模方法所具有的优点和优势,近年来,键合图在风电领域及其组成部件所属学科领域的应用也得到了广泛关注和推广,并在国内外学者的共同努力下,取得了一些成就。

1.2.1 国外研究现状

风力发电系统是个多组件多能域的系统,针对全局系统建模困难的问题,各国学者将 键合图方法应用于风电领域,对风电系统的有关部件做了不少研究工作。如Agarwal等¹⁸¹将 风力机叶片视为瑞利梁,将每个叶片分为三段,利用键合图理论建立了叶片的结构键合图 模型,并实现了使用叶素动量(BEM)理论得到的气动转矩的键合图描述,结合NACA4415 翼型数据进行了气动特性仿真。Sanchez等^[9]给出了可再生能源供应系统中LC输出滤波器与 三相电机逆变器相连的键合图模型,并将具有双重因果关系的反键合图概念运用于系统的 控制规律设计,最终连接有源和无源负载检测了系统的控制鲁棒性。Alipour等^[10]将风电齿 轮箱的数学模型用键合图进行描述,建立了齿轮箱和轴套的键合图模型,并分析了气动转 矩对齿轮箱的振动影响。Bakka和Karimi^[11]对风力机系统进行了简单的键合图描述,并利用 键合图建模与仿真软件 20-sim和Matlab/Simulink软件对系统进行仿真,通过仿真结果的对 比,验证了键合图方法的有效性和可行性。之后,他们^[12]利用键合图方法对风力发电机系 统进行了扩展研究,对包含变桨机构在内的系统的非线性模型进行了描述,利用 20-sim软 件和Matlab/Simulink软件进行仿真分析,对比仿真结果,验证了所建模型的正确性,并说 明了键合图方法的优点,但所建模型依然较为简单。Umesh Rai和Umanand^[13]对双馈三相异 步电机进行线性化处理和相应的理想化假设,建立了其在常见abc坐标系下的键合图模型, 并利用Matlab/Simulink进行了仿真分析。Kim和Bryant^[14]根据鼠笼型异步电机的实际物理结 构,建立了其键合图模型,根据所建模型推导出系统的状态方程,利用 20-sim软件仿真分 析了电机的运行特性。Landen^[15]利用键合图理论对电磁系统进行了建模与分析,为建立用 于研究电磁系统中各种问题的模型,提供了标准的方法,并将键合图理论进一步拓展,来 解决电磁系统中的一些传统方法分析所不能方便解决的问题。Ronkowski^[16]利用键合图的 相关专业软件库对电机进行了建模。Batlle^[17]利用键合图理论对机电系统进行建模和研究, 并给出了简单的交流发电机的键合图模型。Umesh Rai等^[18]提出了一个基于键合图理论的 异步发电机模型,直观的表达出能量在发电机中的传递和变化过程。Umarikar等^[19]提出了 开关功率结点的概念,利用键合图理论对开关系统进行建模,并对电路开关系统建模,进 一步阐述了开关功率结点的概念。这些研究涉及了风电系统的多个学科领域,对系统的某 个或少数几个部件进行了键合图建模及其动态分析,但并没有对系统进行较为全面的建模 研究,不过这些研究成果对本课题的进行具有十分重要的指导意义。

1.2.2 国内研究现状

我国风电产业发展与欧洲发达国家相比,起步较晚。但经过 20 年的科技攻关,在国 家有关部门和地方政府的支持下,我国风能利用技术有了很大提高,积累了不少成功的经 验。但在风力发电系统的动力学特性研究方面才刚起步,主要是借鉴国外的经验进行建模 和分析。与国外相比,键合图方法在我国的研究、应用起步也较晚,国内利用键合图方法 对风电系统进行研究,也主要是从局部出发,对系统的某个或某几个主要部件进行键合图 建模分析及仿真。如高海鸥^[20]利用键合图理论深入分析了包括电动机、发电机、发动机、 差速器、行星齿轮机构和减速器等部件的混合动力汽车(HEV) 的驱动系统,并建立驱动系 统的动态模型进行仿真分析,仿真结果表明使用键合图理论建立的驱动系统模型,可以更 精确地反映HEV驱动过程中的细微之处,且方便的根据系统要求修改键合图模型。刘云^[21]通 过推导出键合图各要素相似所对应的动力学相似条件,并结合键合图模态分析理论,给出 了系统频率、振型等主要模态参数的相似关系,从而提出了一种能适用于复杂机电系统相 似设计及模型试验的方法。李庆凯^[22]利用绝对速度法建立了封闭式行星轮系的键合图模 型,并得到了整个轮系及其转换机构的功率流情况。孙伟^[23]采用键合图方法分析了风电齿 轮传动系统的动力学特性,为快速准确求得可靠性评估中使用系数和名义转矩提供了一种 新方法。唐进元^[24]运用键合图建模理论建立含间隙和摩擦的齿轮键合图模型,并运用键合 图专用仿真软件 20-sim对含间隙与摩擦的齿轮传动动力学键合图模型进行了仿真求解。袁 敏^[25]基于键合图理论建立了 2K H行星齿轮传动系统的键合图模型,并根据其键合图模型 推导了相应的系统状态方程,利用Matlab进行了动力学仿真:结合行星齿轮系统图画表示 法,分析了系统键合图模型与其之间的联系,得到了两者的转换规律。周卫等^[26]在笼型三 相异步风力发电机数学模型的基础上,分析了发电机 $abc-\alpha\beta0$ 坐标变换的Bond Graph模型, 以及描述发电机中电磁量与机械量的关系,得到了完整的风力发电机键合图模型,并利用 20-sim软件进行了动态仿真,验证了其有效性。李腾等^[27]将键合图方法应用于直线电机的 建模,并且在模型中考虑了直线电机所特有的端部效应影响,得到直线电机及其驱动电机 系统的模型,并通过仿真分析及实验说明了所建立模型的正确性。宋冬然^[28]利用键合图理 论对双级矩阵变换器励磁双馈风力发电系统进行了深入的研究,建立了基于SPJ的键合图 模型、双馈电机键合图模型并利用 20-sim软件进行了仿真分析,结合风轮机键合图模型和 轴系统键合图模型给出了风电系统的键合图模型。贝太周^[29]针对风力发电机组的逆变环 节,将键合图应用于离散系统,建立了并网逆变器的键合图模型,基于键合图模型研究了 逆变器的故障诊断问题,并采用时间因果图定性地分析了逆变器的开路故障和短路故障情

况。尤优^[30]用键合图方法对风电机组液压变桨距系统在功率调节过程中的液压回路进行了 建模分析,根据键合图模型推导出了液压系统的状态方程,并用Matlab进行了动态仿真分 析。程嵩^[31]利用键合图理论对汽轮发电机组轴系的动态结构图进行建模与分析,并建立了 基于轴系键合图等效电路的电力系统次同步振荡发电机组等效电路。他们的这些工作对本 课题的研究具有很强的借鉴意义。

1.3 风力发电系统建模框架

对一般的结构系统,其键合图建模流程,如图 1-2 所示。而本文可根据图 1-3 所示的 风力发电系统键合图建模框架进行相关内容的研究。



图 1-2 键合图建模的流程图

Fig.1-2 The flowchart of bond graph modeling





Fig.1-3 The framework of bond graph modeling of wind power generation system

1.4 本文主要研究内容及结构安排

本文利用键合图方法,通过分析风电系统中各部件的结构组成或动力学模型示意图, 对风力发电系统进行键合图建模研究,并重点探讨风电系统中传动链和发电机的键合图模型的建立,及进行相关的特性分析。

论文工作内容及各章节安排如下:

一、绪论。首先说明课题的背景及意义,接着介绍键合图在风电及其组成部件所属领 域的应用的国内外研究现状,然后给出风力发电系统的键合图建模框架,为全文构建一条 主线。

二、键合图方法的基本理论知识。首先阐述键合图中的常用术语及系统变量,为后续 内容做铺垫;然后介绍键合图元的分类标准并详细分析常用基本元件的势、流关系及其相 关应用;接着对基本元件的因果关系进行说明;在此基础上,介绍常见系统的键合图建模 方法;最后归纳出由键合图模型列写状态方程的步骤。

三、风力机传动系统的键合图建模分析。首先简述常见的风力机传动系统及所含齿轮 箱的物理组成和内部结构;然后从传动链的物理构造出发,将传动链分为低速轴侧、高速 轴侧和齿轮箱等三个部分,并分别进行键合图建模及齿轮箱的仿真分析,对它们进行耦合 得到传动链的键合图模型;在此基础上,利用键合图模态分析方法对其进行模态分析,求 解传动系统的固有频率和振型模态。

四、笼型异步发电机的键合图建模分析。首先介绍三相异步发电机的物理模型,分析 不同坐标之间的变换关系并建立由三相静止 A-B-C坐标系变换到两相任意旋转 d-q坐标 系的变换矩阵的键合图模型,进一步对模型进行验证;接着从三相异步发电机的等效电路 图入手,建立发电机的键合图模型;然后推导发电机的状态方程,与对应的数学模型进行 对比验证;最后利用 20-sim 软件对电机进行仿真分析。

五、风力发电系统的键合图模型。由风力机空气动力学知识,建立风力机风轮气动键 合图模型;将风力机变桨机构等效为一个二阶系统,对变桨机构进行键合图描述,接着对 两个模型进行综合验证分析;考虑塔架水平方向的运动,构建塔架水平运动键合图模型并 对模型进行验证;然后对电网侧模型进行简单的键合图描述;最后将所建的各部分键合图 模型进行耦合,探讨风机系统的键合图模型。

最后,总结与展望。总结全文所做的研究工作,并提出下一步研究工作展望。

第2章 键合图方法的基本理论知识

键合图以简单的形式、直观的表现手法描述出多能域耦合系统内各组成部分的物理结构及系统中存在的各种动态影响因素,且它和系统动态数学模型(状态方程)之间具有完全一致性,因此只要系统有确定的物理模型,就可以画出该系统的键合图模型,从而得到 对应的数学模型(状态方程)^[32]。风力发电系统涉及到风能、机械、电磁、液压等多个能量范畴,是一个复杂的多能域耦合系统,可以利用键合图方法对其进行建模和整机系统的控制研究。

为了更好的阐述本文的研究内容,下面对键合图方法的基础理论知识^[32-37]作简要的叙述。

2.1 键合图基本概念

2.1.1 键合图常用术语

一、键合图

键合图是依据能量守恒基本原则,使用图形符号对多能量范畴的系统进行建模及动态 分析的一种图形。由于其从功率观点来反映系统中信息的流向及相互关系,因此又称为功 率键合图、功率流图,简称键图。

二、通口

键合图元件之间存在着功率和信息的传递,其中元件间相互连接并传递能量的地方,称之为通口(Port)。在键合图中,每个通口用一根直线段表示,画在键合图元件的一端, 一根直线关联着两个通口,而一个通口则仅涉及一个键合图元件。

三、键

在两个键合图元件之间的通口直线一端加上表示功率流向或信号流向的箭头后就成为了键。通常有两种键:功率键和信号键。在通口线一端标注半箭头,表示 *e* 和 *f* 取正值时的功率流向,叫功率键;而在通口线一端标注全箭头,表示信号 *e* 或 *f* 在键的两端进行传递时,叫信号键。

四、因果划

因果划是指画在键的一端,并与键垂直的一短划。具有因果划的一端表示势的方向, 而没有因果划的一端则表示流的方向。

2.1.2 广义变量

键合图理论将多种物理参量统一归纳为 4 种广义变量:势变量 e、流变量 f、广义动量 p 和广义位移 q。通常它们都是时间的函数,又分别表示为 e(t), f(t), p(t), q(t)。

一、功率变量

功率变量有两种:势变量 *e*(*t*)和流变量 *f*(*t*)。因为它们的乘积等于流入或流出通口的瞬时功率,即

$$P(t) = e(t) \cdot f(t) \tag{2-1}$$

在不同能量领域中,通口之间相互作用的功率不同,但都可以用式(2-1)来表示功率, 所以称势变量和流变量为功率变量。

二、能量变量

能量变量也有两种: 广义动量 *p*(*t*) 和广义位移 *q*(*t*)。因为流入或流出一个通口的能量 *E*(*t*) 为

$$E(t) = \int^{t} P(t) dt = \int^{t} e(t) \cdot f(t) dt = \int^{t} e(t) dq(t) = \int^{t} f(t) dp(t)$$
(2-2)

其中, 广义动量 p(t) 为

$$p(t) = \int^{t} e(t) dt = p_0 + \int^{t}_{t_0} e(t) dt$$
 (2-3)

式中 $p_0 - t_0$ 时刻的初始动量。

广义位移q(t)为

$$q(t) = \int^{t} f(t) dt = q_0 + \int^{t}_{t_0} f(t) dt$$
(2-4)

式中 $q_0 - t_0$ 时刻的初始位移。

若将式(2-2)中自变量t分别换成p和q,则可以得到

$$E(p) = \int^{p} f(p)dp \qquad (2-5)$$

$$E(q) = \int^{q} e(q) dq \qquad (2-6)$$

所以,称广义动量和广义位移为能量变量。

在不同能量系统中键合图的广义变量具有不同的表现形式,如表 2-1 所示。

	机械系统 平移 旋转		电系统 液压系统		热力学系统
势变量 e	力F (N)	转矩 <i>τ</i> (N⋅m)	电压 u (V)	压力P (Pa)	温度 T (K)
流变量 f	速度v(m/s)	角速度 ω (rad/s)	电流 <i>i</i> (A)	流量 Q (m ³ /s)	熵流 <i>Ś</i> (W/K)
广义动量 p	动量 $P = F \cdot t$ (N·s)	角动量 $P_T = T \cdot t$ (N·m·s)	磁通量λ (V·s)	压力动量 P_p (Pa·s)	_
广义变位 <i>q</i>	位移x (m)	转角 <i>θ</i> (rad)	电荷 q(A·s)	体积V (m ³)	熵 S (J/K)
功率 $p = e \cdot f$	$F(t) \cdot v(t)$ (W)	$\tau(t) \cdot \omega(t)$ (W)	$u(t) \cdot i(t)$ (W)	$p(t) \cdot Q(t)$ (W)	$T(t)\cdot\dot{S}(t)$ (W)

表 2-1 键合图在不同系统中广义变量的含义

Tab.2-1 The meanings of generalized variables in the different systems

四种广义变量之间存在如图 2-1 所示的关系。



图 2-1 四种广义变量间的关系

Fig.2-1 The relationship between the generalized variables

上图是个"状态四面体",四种广义变量 *e*, *f*, *p*, *q* 分别代表四面体的四个顶点,其中两条边反映了 *p*-*e*, *d*-*f* 之间的关系。

2.2 键合图基本元件

实际的系统往往由多个子系统构成,且常常涉及多个能量范畴,这些子系统又由与能量相关的多种基本元件组成,利用这些基本的键合图元件可以对多能域系统模型进行准确的描述。

对基本的键合图元件,按照不同的划分标准有不同的分类,通常有下述两种划分标准: 1)按元件的通口数目可分为:一通口元件、二通口元件和多通口元件; 2) 按与能量有关的物理特性可分为:供能元件(源元件)、储能元件、耗能元件、能 量形式转换元件,和能量守恒分配方式元件。

2.2.1 一通口元件

一通口元件是指仅用一根键连接,并具有单一功率通口的元件。基本的一通口元件有 五种,它们各自的键图符号、势变量 *e* 和流变量 *f* 之间的关系及其在物理系统中相对应的 组件,具体可见表 2-2。

元件	键图	一般关系	说明	应用举例
惯性元件I	$\frac{\dot{p}}{f}$ I	线性: $f = p / I_0$ 非线性: $f = \phi_I(p)$	储能元件,描述系统中惯性 效应; e和f之间存在静态函 数关系	机械(惯性效应), 电(电感),液压(液 感)等
容性元件 C	$\frac{e}{\dot{q}}$	线性: $e = q / C_0$ 非线性: $e = \phi_c(q)$	储能元件,描述系统中容性 效应; e和f之间存在静态函 数关系	机械(弹簧、扭力 棒),电(电容器), 液压(水箱、储能器) 等
阻性元件 R	$\frac{e}{f} \sim R$	线性: $e = R_0 f$ 非线性: $e = \phi_R(f)$	耗能元件,描述系统中功率 消耗; e和f之间存在静态函 数关系	机械(阻尼器), 电(电阻器),液压 (管道阻尼、节流 器)等
势源 Se	Se <u></u>	_	供能元件,为系统提供功率; e保持恒定,f可变化	柴油机,电源,带 调压装置的液压泵 (变量液压泵)等
流源 Sf	Sf - f	_	供能元件,为系统提供功 率; f保持恒定,e可变化	集中的传动轴,发 电机,定量液压泵等

表 2-2 一通口元件 Tab.2-2 The 1-port elements

注: I_0 为线性惯量参数, C_0 为线性容度参数, R_0 为线性阻率参数, ϕ_I, ϕ_C, ϕ_R 均为非线性代数函数。

2.2.2 二通口元件

二通口元件是指与两根键相连且具有两个功率通口的元件。基本的二通口元件有四种,具体如表 2-3 所示。它们均遵守功率守恒原则,即从元件一侧流入的功率等于从另一侧流出的功率。在元件第二种划分标准中属于能量形式转换元件,它们能处理各种能量形式的转换,并能有效的对多能域物理系统进行描述。

元件	键图	一般关系	说明	应用举例
变换器 TF	$\frac{e_1}{f_1} \xrightarrow{m} \frac{f_2}{f_2} \xrightarrow{m} \frac{f_2}{f_2}$	$\begin{cases} e_2 = m \cdot e_1 \\ f_1 = m \cdot f_2 \end{cases}$	反映系统中势 变量之间成正比	机械(刚性杠杆、齿 轮减速器),电(变压 器),液压(液压缸) 等
调制 变换器 MTF	$\begin{array}{c} & & & \\ \hline e_1 & & \\ \hline f_1 & & \\ \end{array} MTF & \hline f_2 \end{array} $	 m 为变换器的模数 m 为非定常数时, 构成调制变换器 	例,流变量之间也 成正比例的关系	机械(速比可调变速 器),电(可调变压器), 液压(变量泵)等
回转器 GY	$\frac{e_1}{f_1} \xrightarrow{r} GY \frac{e_2}{f_2}$	$\begin{cases} e_1 = r \cdot f_2 \\ e_2 = r \cdot f_1 \end{cases}$	反映系统能量 传递过程中输入	机械(转臂、动圈式 快速阀),电(激励恒 定的直流发电机或电 动机)等
调制 回转器 <i>MGY</i>	$\begin{array}{c} \begin{array}{c} e_1 \\ \hline f_1 \end{array} & MGY \\ \hline f_2 \end{array}$	r为回转器的模数, r为非定常数时, 构成调制回转器	和瓶亞量之间的交叉比例关系	电(可变激励电流的 直流电机)等

表 2-3 二通口元件

Tab.2-3 The 2-port elements

2.2.3 多通口元件

作为能量守恒分配方式元件,它可以按一定的函数关系将功率进行分配,并通过通口 键与其他的基本通口元件相结合,构成复杂的混合多能域系统,是键合图中重要的元件, 它又包含两种元件: 0-结和 1-结,又称为共势结和共流结,具体见表 2-4 所示。

表 2-4 多通口元件

元件	键图	一般关系	说明	应用举例	
0-结 (共势结)	$\frac{e_1}{f_1} = 0 \frac{e_n}{f_n}$	$\begin{cases} e_1 = e_2 = \dots = e_n \\ \sum_{i=1}^n \xi_i f_i = 0 \end{cases}$	各键上流变量 代数和为0,势变 量数值相等	电(并联电路),液 压(并联管路系统) 等	
1-结 (共流结)	$\frac{e_1}{f_1} \frac{e_2}{1} \frac{e_n}{f_n}$	$\begin{cases} f_1 = f_2 = \dots = f_n \\ \sum_{i=1}^n \xi_i e_i = 0 \end{cases}$	各键上势变量 代数和为0,流变 量数值相等	机 械 (固 定 联 轴 节), 电 (串联电路), 液压 (直径小,管路 长的管道系统)等	

Tab.2-4 The multi-port elements

表中,n为通口数; ξ_i 为功率流向系数,如果一个键的半箭头指向 0-结或 1-结,取 $\xi_i = 1$, 表示功率流入 0-结或 1-结;如果一个键的半箭头背离 0-结或 1-结,则 $\xi_i = -1$,表示功率 从 0-结或 1-结流出。

2.3 元件的因果关系

在键合图中,因果关系是用因果划来表示的,在一个键中有因果划的一端,表示势的 方向,而另一端则表示流的方向。向着元件的一端为因,离开元件的一端为果。常见的两 种因果形式,如图 2-2 所示。



Fig.2-2 Causal forms

图 2-2 中, A 和 B 表示相互键接的两个基本键合图元件,图(a)中因果划向着元件 B,则对于 B, e 为因, f 为果;而对于 A, f 为因, e 为果。图(b)中元件的因果关系则恰好 与图(a)元件的因果关系相反。

键合图中常见的9种基本元件的因果关系如表 2-5 所示。

元件		可能的因果形式	因果关系		
	惯性元件 I	$\xrightarrow{\dot{p}}_{f} I$	$f = \phi_I(p) = \phi_I(\int e \cdot dt), $ 为积分因果关系; 对于 <i>I</i> , 势 <i>e</i> 为因, 流 <i>f</i> 为果		
一通口元件		$ \xrightarrow{\dot{p}} I $	$e = d(\phi_I^{-1}(f)) / dt$,为微分因果关系; 对于 I,流f为因,势 e 为果		
	容性元件 C	$\vdash \frac{e}{\dot{q}} \sim C$	$e = \phi_c(q) = \phi_c(\int f \cdot dt)$,为积分因果关系; 对于 <i>C</i> ,流 <i>f</i> 为因,势 <i>e</i> 为果		
		$\xrightarrow{e} q C$	$f = d(\phi_c^{-1}(e)) / dt$,为微分因果关系; 对于 C,势 e 为因,流f为果		
	阳树 一 树 p	$\xrightarrow{e} R$	$e = \phi_R(f)$: 对于 R , 流 f 为因, 势 e 为果		
		$\xrightarrow{e}{f} R$	$f = \phi_R^{-1}(e)$: 对于 R, 势 e 为因, 流 f 为果		
	势源 Se Se		e(t) = Se,即势为给定		
	流源 Sf	$Sf \vdash f$	f(t) = Sf, 即流为给定		

表 2-5 基本元件的因果关系

表 2-5 基本元件的因果关系(续表)

Tab.2-5 The causality of basic elements (Continued)

二通口元件	变换器 TF	$ \underset{f_1}{\stackrel{e_1}{\longmapsto}} \overset{m}{\underset{TF}{\overset{e_2}{\longmapsto}}} $	$e_1 = me_2$, e_2 为 <i>TF</i> 的输入,对应 e_1 为 <i>TF</i> 的输出 $f_2 = mf_1$, f_1 为 <i>TF</i> 的输入,对应 f_2 为 <i>TF</i> 的输出
		$\xrightarrow{e_1}_{TF} \xrightarrow{l/m}_{TF} \xrightarrow{e_2}_{f_2}$	$e_2 = e_1/m$, e_1 为 TF 的输入,对应 e_2 为 TF 的输出 $f_1 = f_2/m$, f_2 为 TF 的输入,对应 f_1 为 TF 的输出
	回转器 GY	$ \underbrace{\begin{array}{c} e_1 \\ f_1 \end{array}} \stackrel{!!}{GY} \underbrace{\begin{array}{c} e_2 \\ f_2 \end{array}} $	$e_2 = rf_1$, f_1 为 GY 的输入,对应 e_2 为 GY 的输出 $e_1 = rf_2$, f_2 为 GY 的输入,对应 e_1 为 GY 的输出
		$ \xrightarrow{e_1}_{GY} \xrightarrow{1/r}_{GY} \xrightarrow{e_2}_{f_2} $	$f_2 = e_1/r$, e_1 为 <i>GY</i> 的输入,对应 f_2 为 <i>GY</i> 的输出 $f_1 = e_2/r$, e_2 为 <i>GY</i> 的输入,对应 f_1 为 <i>GY</i> 的输出
多通口元件	0-结	$\begin{array}{c} \begin{array}{c} \begin{array}{c} e_2 \\ f_2 \\ e_1 \\ \hline f_1 \end{array} \end{array} \\ \begin{array}{c} e_n \\ e_n \\ \hline f_n \end{array} \end{array} \\ \begin{array}{c} e_n \\ e_n \\ \hline f_n \end{array}$	$e_1 = e_2 = \dots = e_i = \dots = e_n$, $\sum_{i=1}^n \xi_i f_i = 0$ 。键 <i>i</i> 确定 0-结 上公共势, 其余键提供流输入。靠近 0-结只有一根因果 划, 其余因果划应背离 0-结
	1-结	$\begin{array}{c} & & & \\ & & & \\ \hline f_2 \\ e_1 \\ \hline f_1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} & & & \\ & & $	$f_1 = f_2 = \dots = f_i = \dots = f_n$, $\sum_{i=1}^n \xi_i e_i = 0$ 。键 <i>i</i> 确定 1-结上公共流,其余键提供势输入。应有一根因果划背离 1-结,其余因果划应靠近 0-结

2.4 键合图建模

实际工程系统大多是由各种各样的物理系统组成,不同物理系统内能量传递形式也不 相同,常见的能量形式有电能、机械能和流体能(液压能),由能量形式可知,它们隶属 于电系统、机械平动系统、机械定轴转动系统和液压系统。

键合图方法为分析不同能量域的耦合系统提供了方便,对于单一能量域系统可以由一 通口元件和多通口元件共同构成其键合图模型;对于由多种能量域耦合而成的复杂系统, 可以通过引入二通口元件来连接不同能量域系统。一般来说,对于各种复杂系统只要知道 其确切的物理模型,都可以利用基本的键合图元件来对其进行键合图建模。

2.4.1 电系统

建模步骤:

1) 指定电路示意图中的功率流向;

2) 在电路表示中找出具有不同电压的结点,并在每个结点处标注一个 0-结;

3)在两个 0-结之间插入一个 1-结,将产生电流的一通口元件,如 I、R、C、Se、Sf 等元件连接到相应的 1-结上;

4)确定零参考点,通常为接地点,从图中删去该 0-结及与该 0-结相连的各键,若无明显接地电压,则选择任一 0-结,并删去此结点及与此结点相连的各键;

5) 用单键代替具有二通口的 0-结和 1-结,并进行化简,得到最终模型。

2.4.2 机械平移运动系统

其建模步骤如下:

- 1) 在物理系统示意图中,在不同绝对速度的结点处各标注一个1-结;
- 2) 将与绝对速度相关的元件(I、C、R、Se、Sf) 连接到表示绝对速度的 1-结上;
- 3)在两个适当的1-结之间嵌入0-结,将与相对速度相关的元件连接到该0-结上;
- 4) 删除具有零速度的 1-结及其上各键;
- 5) 对键合图进行简化;
- 6)确定各键的功率方向,得到最终模型。

2.4.3 机械定轴转动系统

机械定轴转动系统的键合图建模步骤与机械平移运动系统的相似,其建模步骤如下:

- 1) 在物理系统示意图中,在不同确定角速度的结点处各标注一个1-结;
- 2) 将与确定角速度相关的元件(I、C、R、Se、Sf) 连接到表示确定角速度的 1-结上;
- 3)在两个适当的1-结之间嵌入0-结,将与相对角速度相关的元件连接到该0-结上;
- 4) 删除具有零角速度的 1-结及其上各键;
- 5) 对键合图进行简化;
- 6)确定各键的功率方向,得到最终模型。

2.5 由键合图模型列写状态方程

对模型进行键合图的增广操作后,系统的状态方程就可以以一种非常直接的方式列写 出来。

2.5.1 键合图的增广

键合图的增广包括:

1. 按顺序对各键编号;

2. 对各键指定功率流向;

3. 对各键的一对变量 e 和 f 标注因果关系,标注步骤如下:

1)任选一源(Se 或 Sf),指定符合要求的因果关系,然后利用 0-结、1-结、TF 和 GY 等元件的规则,在图中尽可能地进行因果关系的扩展。

2) 重复步骤(1), 直至所有源都指定了因果关系。

3)任选一储能元件(C或I),优先指定其积分因果关系,并按0-结、1-结、TF和GY 等元件的规则,在图中尽可能地进行因果关系的扩展。

4) 重复步骤(3), 直至所有储能元件都指定了因果关系。

5)任选一未指定因果关系的耗能元件 *R*,任意给定因果关系,并按 0-结、1-结、*TF* 和 *GY* 等元件的规则,在图中尽可能地进行因果关系的扩展。

6) 重复步骤(5), 直至所有 R 元件都指定了因果关系。

7)任选一剩余的,连接两个约束元件且未指定因果关系的中间键,为其指定一个任意的因果关系,并按 0-结、1-结、TF 和 GY 等元件的规则,在图中尽可能地进行因果关系的扩展。

8) 重复步骤(7), 直至所有剩下的键都指定了因果关系。

2.5.2 列写状态方程的基本步骤

对于键合图增广后的模型,由于其可能包含不同类型的因果关系,一般,系统键合图 模型可以分为两种类型:全积分因果关系模型和含有微分因果关系模型,因此由键合图模 型列写状态方程需要根据模型中因果关系类型的不同而采取不用的方法或步骤。

一、含全积分因果关系时,状态方程的列写步骤

全积分因果关系的键合图模型中所有储能元件都具有积分因果关系,此时,系统状态 变量的数目与所含储能元件的数目是相等的。对已作增广的键合图,可以按下列步骤列写 状态方程:

1)选取关键变量一输入变量 U 和能量状态变量 X。其中输入变量是 Se 元件的势和 Sf 元件的流;状态变量是 I 元件的广义动量 p 和 C 元件的广义位移 q。

2)根据各储能元件和阻性元件的特性方程列写键合关系式,即X与*e*、*f*之间的关系式和*e*与*f*之间的关系式。

3) 根据 0-结、1-结的约束条件,列写各状态变量导数 X 的方程。

4) 将各储能元件和阻性元件的键合关系式代入X方程中, 整理得到系统状态方程。

二、含有微分因果关系时,状态方程的列写步骤

按优先指定积分因果关系的原则进行键合图因果关系标注时,有时某些储能元件具有 微分因果关系。此时,系统状态变量的个数与具有积分因果关系的储能元件数相等。由该 类键合图列写状态方程时,将会遇到代数环问题,有时甚至非常复杂。其列写状态方程的 具体步骤如下:

1)选取关键变量一输入变量 U 和能量状态变量 X。其中输入变量是 Se 元件的势和 Sf 元件的流;状态变量是具有积分因果关系的储能元件的广义动量 p 和广义位移 q。

2)根据各具有积分因果关系的储能元件以及阻性元件的特性方程列写键合关系式,
 即 X 与 e、f之间的关系式和 e 与f之间的关系式。

3)用有关状态变量表达微分因果关系储能元件的广义动量或广义位移,将所得表达 式对时间求一阶导数。

4)列写表达具有积分因果关系储能元件的X的方程。

5) 将步骤(2) 和(3) 所得的结果代入X 方程中,整理得到系统状态方程。

2.6 本章小结

本章分五部分介绍了键合图方法的一些基本理论知识,第一部分简述了键合图方法中 的常用术语和四种广义变量;第二部分介绍了常见基本元件的分类标准以及三种基本的通 口元件;第三部分以表格的形式说明了基本通口元件的因果关系;第四部分给出了电系统、 机械系统的键合图建模步骤;最后,归纳了具有全积分因果关系的键合图模型和含微分因 果关系的键合图模型列写状态方程的步骤。

第3章 风力机传动系统的键合图建模分析

据估计一台风力机大概有 20 年的寿命,但通常条件下,风电齿轮箱每隔 5 年就需要 更换^[38],所以,目前很多大型的风力机制造商都有意使用不含齿轮箱的直驱型风力机。但 如今,世界上已安装的总装机容量为 270GW的风力机中绝大部分都是含有齿轮箱的^[39], 可见带齿轮箱的风电机组目前还是占据主导地位,且国内外不少专家学者在对风电传动系 统进行研究时都考虑了齿轮箱。风电传动系统是风力机组的关键部分,它将风轮捕获的风 能转变为机械能,再经齿轮箱的传递,带动发电机工作,将机械能转换为电能,从而实现 了从风能到电能的有效转换。该系统涉及到不同的能量领域,许多学者也利用键合图方法 对其进行了建模和不同角度的分析,但是大量的文献在建模中都是利用等效集中质量法^[40] 简单的将该系统视为由一些质量块^[41-42]组成,并没有建立精确的模型。文献[43]把齿轮箱 作为变速器,建立了其键合图模型,文献[44]分析了齿轮箱中行星齿轮部分,考虑了行星 轮间的啮合刚度,并建立了相应的键合图模型,最后利用键合图模态分析法^[45]对该结构进 行了模态分析。齿轮箱作为能量传动装置,受到风轮一侧和发电机一侧的共同影响,其往 往容易发生故障或损坏,故利用键合图方法建立其键合图模型,并对其进行动态分析,将 对齿轮箱的设计及其故障检测具有十分重要的意思。本文在考虑旋转这一单自由度基础 上,对传动系统进行细分,建立风电传动系统的键合图模型;以某 750kw的风力机作为研 究对象,利用键合图—模态分析方法对传动系统进行模态分析。

3.1 风力机传动系统模型

在风力机传动系统中,风电齿轮箱的输入轴直接与风轮相连,风轮受到气动转矩的作 用开始旋转,在受到低速重载轴承的作用后,仅把扭矩传递给齿轮箱,再经齿轮箱的传递, 带动发电机运转而发电,该过程中发生的力、转矩或速度间的传递、转变或转换关系,实 质上是风能、机械能和电能三种能量间的传递、转变、转换关系。齿轮箱作为该传动装置 的主要部件,其三维模型如图 3-1 所示。



图 3-1 齿轮箱三维模型

Fig.3-1 3 D model of the gear box

可将齿轮箱分为三级:一级低速行星齿轮和两级高速平行轴齿轮。其包含的具体构件 可见风力机传动系统模型,即图 3-2 所示。常见的风力发电机传动系统是由风轮、低速轴、 齿轮箱、高速轴和发电机等五个部分组成^[46],由于本文着重研究传动系统的扭转振动,所 以在对该系统的建模过程中,利用等效集中质量法对各构件进行集中转动惯量处理,将低 速轴转动惯量并入到风轮侧,高速轴转动惯量并入到发电机一侧。



图 3-2 风力机传动系统示意图

Fig.3-2 The schematic diagram of a wind turbine drive train

由上图并结合图 3-1 知,风机齿轮箱中的一级行星齿轮由行星架、太阳轮、均匀分布 的三个相同的行星轮以及内齿圈构成;由齿轮 1 和齿轮 2 啮合构成第一级平行轴齿轮,齿 轮 3 和齿轮 4 啮合构成第二级平行轴齿轮。*T_{aero}*和*T_{em}分别表示风作用在风轮上产生的风* 轮气动转矩和发电机产生的电磁转矩。本文忽略齿轮箱内部旋转齿轮间的啮合阻尼和摩擦 力,考虑齿轮的惯性,齿轮间的啮合刚度和内齿圈的扭转支撑刚度。

3.2 风力机传动系统的键合图建模

由 3.1 节知,风力机传动系统由 5 个部分组成,而在键合图建模过程中,利用集中参数法,可以将低速轴和风轮等效为一个质量块,高速轴和发电机转子也等效为一个质量块, 所以可以将传动系统视为由低速轴侧、齿轮箱和高速轴侧三部分组成,下面将对这三个部分进行键合图建模。

3.2.1 低速轴侧模型

低速轴是连接风轮和齿轮箱,把扭矩传递给齿轮箱的一根主轴,由键合图理论,可以 将其视为一阻尼-弹簧模型,故低速轴侧的动力学模型如下图所示。



图 3-3 低速轴侧动力学模型

Fig.3-3 Dynamic model of low-speed shaft side

利用牛顿第二定律对动力学模型进行分析,得到如下运动微分方程:

$$J_{rot}\ddot{\phi}_{rot} + D_l(\omega_{rot} - \omega_c) + K_l(\phi_{rot} - \phi_c) = T_{aero}$$

$$J_c'\ddot{\phi}_c - D_l(\omega_{rot} - \omega_c) - K_l(\phi_{rot} - \phi_c) = -T_{pc}$$
(3-1)

式中 J_{rot} 、 J_{c}' 一分别为风轮转动惯量和绕行星架中心的等效转动惯量;

 D_1 、 K_1 一分别为低速轴的阻尼和扭转刚度;

 T_{aero} 、 T_{pc} 一分别为风轮力矩和齿轮对行星架的反作用力矩;

 ϕ_{rat} 、 ω_{rat} 一分别为风轮的角位移和角速度;

 ϕ_{c} 、 ω_{c} 一分别为行星架的角位移和角速度。

根据机械转动系统的键合图建模方法,对低速轴侧动力学模型进行键合图描述可以得 到其非常直观的键合图模型,如图 3-4 所示。其中,共流结 1₀,1₁分别表示风轮和行星架 的角速度;1₂与 0-结相连表示两个I元件间的转速不同,但传递的力矩相同,与R、C元件 相连表示阻性元件和容性元件间具有相同的转动速度。



图 3-4 低速轴侧键合图模型

Fig.3-4 Bond graph model of low-speed shaft side

由于键合图模型中含有两个 I 元件和一个 C 元件,由键合图模型列写系统状态方程的 步骤,可以得到该模型的三个状态方程,如下

$$\dot{p}_{2} = e_{2} = e_{1} - e_{3} = T_{aero} - R_{5}f_{6} - \frac{q_{6}}{C_{6}}$$

$$\dot{q}_{6} = f_{6} = f_{3} - f_{7} = \frac{p_{2}}{I_{2}} - \frac{p_{8}}{I_{8}}$$

$$\dot{p}_{8} = e_{8} = e_{7} + e_{9} = (R_{5}f_{6} + \frac{q_{6}}{C_{6}}) - T_{pc}$$
(3-2)

将相应参数代入式(3-2)并进行简单的处理,可以得到与式(3-1)一致的方程,这 便验证了所建键合图模型的正确性。

3.2.2 高速轴侧模型

高速轴将齿轮箱和发电机连接起来,将齿轮箱的输出力矩传递给发电机,带动发电机 运转。与低速轴一样,在此将高速轴等效为一阻尼-弹簧元件。因为齿轮箱两级平行轴齿轮 中都是一个齿轮与另一个齿轮之间的简单啮合,所以可以用两个模数不同的变换器元件 TF 来描述它们之间的增速关系。为降低建模的复杂度,并保证模型的准确性及便于后续对传 动系统的模态分析,可以将齿轮箱中两级平行轴齿轮部分仅用一个模数为 N 的变换器 TF 来代替,并与高速轴结合为一个整体,其动力学简化模型如图 3-5 所示。



图 3-5 动力学简化模型

Fig.3-5 Simplified dynamic model of high-speed shaft side

与低速轴侧模型分析相似,利用牛顿第二定律对高速轴侧动力学模型进行分析,得到 其运动微分方程,如下

$$J_{s}\ddot{\phi}_{s} + ND_{h}(N\omega_{s} - \omega_{g}) + NK_{h}(N\phi_{s} - \phi_{g}) = T_{ps}$$

$$J_{g}\ddot{\phi}_{g} - D_{h}(N\omega_{s} - \omega_{g}) - K_{h}(N\phi_{s} - \phi_{g}) = -T_{em}$$
(3-3)

式中 J_s 、 J_g 一分别为太阳轮和发电机的转动惯量;

 D_h 、 K_h 一分别为高速轴的阻尼和扭转刚度;

 T_{ps} 、 T_{em} 一分别为行星齿轮对太阳轮的作用力矩和发电机的电磁转矩;

 ϕ_{s} 、 ω_{s} 一分别为太阳轮的角位移和角速度;

 ϕ_{o} 、 ω_{o} 一分别为发电机的角位移和角速度。

由动力学模型可以得到其键合图模型,如图 3-6 所示。其中,共流结 1₁₃,1₁₄分别表 示太阳轮和发电机的角速度;变换器TF: *N* 与 1₁₃-结、0-结相连表示两级平行轴齿轮的 增速作用; 1₁₅与R、C元件相连表示阻性元件和容性元件间具有相同的转动速度。



图 3-6 高速轴侧键合图模型

Fig.3-6 Bond graph model of high-speed shaft side

由于键合图模型中含有两个 I 元件和一个 C 元件,所以可以得到该模型的三个一阶微 分方程,如下

$$\dot{p}_{2} = e_{2} = e_{1} - e_{3} = T_{ps} - N(\frac{q_{7}}{C_{7}} + R_{6}f_{5})$$

$$\dot{q}_{7} = f_{7} = f_{5} = N\frac{p_{2}}{I_{2}} - \frac{p_{9}}{I_{9}}$$

$$\dot{p}_{9} = e_{9} = e_{5} + e_{10} = (R_{6}f_{5} + \frac{q_{7}}{C_{7}}) - T_{em}$$
(3-4)

将参数代入式(3-4)并进行简单的处理,可以得到与式(3-3)完全一致的方程,这 便说明了所建的高速轴侧键合图模型是正确的。

3.2.3 齿轮箱键合图模型

由高速轴侧模型知,齿轮箱中的两级高速平行轴被一个变换器 TF 替代,而齿轮箱系 统中一级行星轮实际上是一个复杂的行星轮系,三个相同的行星轮连接在同一个行星架 上,且与内齿圈和中心的太阳轮相互啮合,将来自低速轴侧的输入扭矩传递到高速轴侧。 下面从行星轮系的动态模型入手,建立其键合图模型。





图 3-7 行星齿轮系的动态模型

图 3-8 行星齿轮系动态啮合的物理模型

Fig.3-7 Dynamic model of epicyclic trainFig.3-8 Physical model for dynamic meshing problem在图 3-7 中,根据组件的运动学关系可分别得到 A, B 点处的速度关系,如下:

$$\begin{aligned}
\nu_{pA} &= \omega_c r_r - \omega_p r_p \\
\nu_{rA} &= \omega_r r_r \\
\nu_{pB} &= \omega_c r_s + \omega_p r_p \\
\nu_{sB} &= \omega_s r_s
\end{aligned}$$
(3-5)

其中, $\omega_i n r_i$ (*i* = *p*,*s*,*r*)分别表示各齿轮的旋转角速度和基圆半径;A 点是行星轮和内齿圈的啮合点,B 点是行星轮和太阳轮的啮合点; v_p 是行星轮在啮合点处沿切向方向的速度; $v_A n v_{sB}$ 分别表示A 点处内齿圈线速度和B 点处太阳轮线速度。

图 3-8 为考虑齿轮啮合刚度的行星轮系的物理模型,*K* 表示齿轮间的啮合刚度, *θ*表示相应构建的角位移。根据各组成部件的连接方式,将行星轮系分为三个单元进行分析,即 P-C 单元(行星轮与行星架单元)、P-R 单元(行星轮与内齿圈啮合单元)、P-S 单元(行星轮与太阳轮啮合单元)。

一、P-C单元键合图模型

三个行星轮与同一个行星架相连,从而使每个行星轮具有相同的旋转速度,即它们具有相同的"流",齿轮箱低速轴传入的功率也就被三个行星轮共同传递到太阳轮。由键合图理论,可以得到P-C单元的键合图模型如图 3-9 所示。1-结表示行星架的旋转速度,I元件*J*_c表示行星轮的转动惯量,*J*_{pci} (*i*=1,2,3)表示各行星轮绕行星架中心的转动惯量,势元件Se表示输入到行星架的转矩*T*_c。



图 3-9 P-C 单元键合图模型

Fig.3-9 Bond graph model of P-C unit

二、P-R 单元键合图模型

根据图 3-7 和图 3-8,以 A 点切向方向上内齿圈的线速度和行星轮的线速度为切入点 对齿轮啮合单元 P-R 进行建模分析,得到其键合图模型如图 3-10 所示。



图 3-10 P-R 单元键合图模型

Fig.3-10 Bond graph model of P-R unit

图中,共流结 1₃,1₄,1₇分别表示行星架,行星轮和内齿圈的旋转速度,1₅,1₆分别 表示A点处切向方向上行星轮和内齿圈的线速度;通过变换器TF可以实现速度间的转换, 于是经变换器TF: *r*_r、TF: 1/*r*_r和TF: 1/*r*_p分别得到行星轮相对于内齿圈的线速度,内齿 圈的旋转速度和行星轮的自转速度。一般的,弹簧元件用于反映组件间的相对运动,所以 在 1₅和 1₆之间加入一个 0₁-结来表示行星轮和内齿圈的相对速度。

三、P-S 单元键合图模型

以 B 点处切向方向上行星轮的线速度和太阳轮的线速度为切入点对 P-S 单元进行建模分析,得到其键合图模型如图 3-11 所示。



图 3-11 P-S 单元键合图模型 Fig.3-11 Bond graph model of P-S unit

图中,共流结 1₈, 1₉, 1₁₂分别表示行星架,行星轮和太阳轮的旋转速度, 1₁₀, 1₁₁分 别表示B点处切向方向上行星轮和太阳轮的线速度;经变换器TF: *r_s*, TF: 1/*r_s*和TF: *r_p*分 别得到行星轮绕太阳轮旋转的线速度,太阳轮的旋转速度和行星轮的自转速度。在 1₁₀和 1₁₁之间加入一个 0₃-结,表示行星轮和太阳轮的相对速度。

由上述分析,将各个单元模型进行耦合,并通过等效变换^[33]对结构进行简化去除冗余的元件,得到齿轮箱的整体键合图模型,并通过键合图理论中因果关系标注方法对该模型进行了因果标注,如图 3-12 所示。



图 3-12 齿轮箱键合图模型

Fig.3-12 Bond graph model of gear box

3.2.4 传动系统的键合图模型

由上述各部分的键合图建模分析可知,力矩*T_{pc}*和*T_{ps}*分别作为低速轴侧和齿轮箱,齿轮箱和高速轴侧的耦合参量,可以将各部分的键合图模型耦合在一起,得到传动系统的键合图模型,如图 3-13 所示。



图 3-13 传动系统键合图模型

Fig.3-13 Bond graph model of the drive train

3.3 齿轮箱的仿真分析

以某 750kw水平轴风力机为研究对象,其传动系统的结构参数^[47]如表 3-1 所示。

$\frac{J_{rot}}{(kg \cdot m^2)}$ 5000	$ \begin{array}{r} J_c \\ (kg \cdot m^2) \end{array} $ 59.1	$\frac{J_{p1,2,3}}{(kg \cdot m^2)}$		$\frac{J_{s}}{(kg \cdot m^{2})}$	$\frac{J_g}{(kg \cdot m^2)}$ 18.7	<i>r_r</i> (mm) 148.5	<i>r_p</i> (mm) 58.5	<i>r</i> _s (mm) 31.5
K _{pr} (N/m)	K _{ps} (N/m)	K _{rg} (N/m)	K ₁ (Nm/rad)	K _h (Nm/rad)	D ₁ (N/m)	D _h (N/m)	Ν	i
1.69e9	1.69e9	5.74e7	3.67e7	1.0e8	200	1.0e-3	11.2	64.2

表 3-1 750kw 风力机传动系统的结构参数 Tab.3-1 Structural parameters of a 750kw wind turbine

对齿轮箱进行仿真分析,其结果如图 3-14 所示。起始时给齿轮箱施加一个扭矩 *Tc*=3000N.m,经过增速齿轮箱传递到高速轴的扭矩 Th 先产生动态振动,后快速地稳定 到 46.74N.m,此时增速箱的传动比为i=3000/46.74=64.18。0.2s 后再施加一个幅值为 1500N.m 的阶跃信号,由于转动惯量和抗扭刚度的作用,大约 0.1s 后输出的高速轴扭矩达 到平衡 Th=70.11N.m,此时传动比i=4500/70.11=64.18。在两种激励的仿真下 i 与理想 传动比相差很小,说明齿轮箱键合图模型是正确的。同时图中也分析了两种情况下,高速 轴和齿圈的扭转振动响应,并与输出扭矩的动态特性存在一致性。

在同一激励下,改变啮合刚度,对高速轴和内齿圈的扭转振动进行仿真分析,结果如

图 3-15 所示。当 $K_{rg} = 6e7$ N/m, $K_{pr} = K_{ps} = 1.69e7$ N/m时,结果如图(a)所示。当 $K_{rg} = 6e7$ N/m,其他参数不变时,结果如图(b)所示。对比图 3-14 和图 3-15,说明可以对齿轮箱进行参数优化设计。


















3.4 传动系统的模态分析

3.4.1 键合图模态分析法

本文利用文献[45]介绍的键合图一模态分析法对传动系统进行模态分析,其基本思路 是利用键合图法在多能域耦合系统分析中的优点,将其应用于不同能域耦合系统的建模和 模态分析,形成一种复杂机电耦合系统动力学建模与模态分析的新方法。

对于某含有m个储能元件的线性系统,设其对应的全积分因果关系键合图模型,如图 3-16 所示。



图 3-16 全积分因果关系键合图模型

Fig.3-16 Bond graph model with complete integral causality

根据键合图模型列写状态方程的有关规则及其变量间的逻辑因果关系^[33],上图的状态 方程可表示为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \tag{3-6}$$

式中, **X** = [**P** \vdots **Q**]^T = [$p_1 \cdots p_a \vdots q_1 \cdots q_b$]^T

A为 $m \times m = (a+b) \times (a+b)$ 阶方阵,一般为非对称降秩矩阵; p为惯性元件 I 的广义 动量; q为容性元件 C 的广义位移 (p,q实质为 Hamilton 正则变量); a为独立的 I 元件数; b为独立的 C 元件数。

式(3-6)的特征值问题为

$$\lambda \Phi = A \Phi \tag{3-7}$$

该方程有m = a + b个特征值及相应的特征向量,设矩阵**A**的秩为r(通常 $r \le m$),零 特征值的个数为s,则m = a + b = r + s,r可以由矩阵 A 求得,也可以直接由键合图模型 按文献[12]的方法求出。若系统中没有阻尼而且也不存在 GY 元件,则a,b,r,s还存在如下 简单协调关系,即:若a > b,则s = a - b,r = 2b;若a < b,则s = b - a,r = 2a。

一般地,由A阵可得*m*个特征值,将它们分别代入式(3-7)可得对应的*m*个特征向量,分别记为:

$$\boldsymbol{\lambda} = diag \left[\lambda_1 \cdots \lambda_r \quad \overrightarrow{0 \cdots 0} \right] = \left[\boldsymbol{\Lambda}_r \quad \boldsymbol{0} \right]$$
(3-8)

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \cdots \Phi_r & \Phi_1^0 & \cdots & \Phi_s^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_r & \boldsymbol{\Phi}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_p \\ \boldsymbol{\Phi}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_{pr} & \boldsymbol{\Phi}_{ps} \\ \boldsymbol{\Phi}_{qr} & \boldsymbol{\Phi}_{qs} \end{bmatrix}$$
(3-9)

由上述分析可知,显然由式(3-7)可得到一对偶模态 Φ_p 和 Φ_q (即第1类模态和第2 类模态)以及它们的同形模态。

状态变量 p 对应的模态 Φ_p 是动量模态,根据键合图理论,在积分因果关系下,由惯性元件 I 的特性方程,动量模态易转化为位移模态 Φ_u ,在文中则为角位移模态,即

$$\mathbf{\Phi}_{\theta_i} = diag \left[(I_j \lambda_i)^{-1} \right] \mathbf{\Phi}_{p_i}$$
(3-10)

其中, $i=1,2,\dots,b$; $j=1,2,\dots,a$ 。

与状态变量q对应的模态 Φ_q 是变形模态,由容性元件 C 的特性方程,传动系统中变形模态也易转化为力模态 Φ_r ,即

$$\mathbf{\Phi}_{Fj} = diag \left[C_j^{-1} \right] \mathbf{\Phi}_{qi} \tag{3-11}$$

3.4.2 固有频率和对应振型

根据上述键合图模态分析方法,对不含阻尼的传动系统进行模态分析,将图 3-13 中所 含阻性元件 R 删除,并根据键合图理论对模型进行增广处理后得到不含阻尼的传动系统键 合图模型,如图 3-17 所示。其中系统结构参数同表 3-1。





根据各储能元件的特性及其因果关系,对图 3-17 列写系统的状态方程,有 对 I 元件

$$\begin{split} \dot{p}_{2} &= e_{2} = e_{1} - \frac{q_{4}}{C_{4}} \\ \dot{p}_{6} &= e_{6} = \frac{q_{4}}{C_{4}} - \frac{r_{r}q_{31}}{C_{31}} - \frac{r_{s}q_{32}}{C_{32}} - \frac{r_{r}q_{33}}{C_{33}} - \frac{r_{s}q_{34}}{C_{34}} - \frac{r_{r}q_{35}}{C_{35}} - \frac{r_{s}q_{36}}{C_{36}} \\ \dot{p}_{39} &= e_{39} = \frac{r_{p}q_{31}}{C_{31}} - \frac{r_{p}q_{32}}{C_{32}} \\ \dot{p}_{44} &= e_{44} = \frac{r_{p}q_{33}}{C_{33}} - \frac{r_{p}q_{34}}{C_{34}} \\ \dot{p}_{49} &= e_{49} = \frac{r_{p}q_{35}}{C_{35}} - \frac{r_{p}q_{36}}{C_{36}} \\ \dot{p}_{52} &= e_{52} = \frac{r_{r}q_{31}}{C_{31}} + \frac{r_{r}q_{33}}{C_{33}} + \frac{r_{r}q_{35}}{C_{35}} - \frac{q_{53}}{C_{53}} \\ \dot{p}_{54} &= e_{54} = \frac{r_{s}q_{32}}{C_{32}} + \frac{r_{s}q_{34}}{C_{34}} + \frac{r_{s}q_{36}}{C_{36}} - N\frac{q_{57}}{C_{57}} \\ \dot{p}_{59} &= e_{59} = \frac{q_{57}}{C_{57}} + e_{60} \end{split}$$

$$(3-12)$$

对 C 元件

$$\begin{aligned} \dot{q}_{4} &= f_{4} = \frac{p_{2}}{I_{2}} - \frac{p_{6}}{I_{6}} \\ \dot{q}_{31} &= f_{31} = \frac{r_{r} p_{6}}{I_{6}} - \frac{r_{p} p_{39}}{I_{39}} - \frac{r_{r} p_{52}}{I_{52}} \\ \dot{q}_{32} &= f_{32} = \frac{r_{s} p_{6}}{I_{6}} + \frac{r_{p} p_{39}}{I_{39}} - \frac{r_{s} p_{54}}{I_{54}} \\ \dot{q}_{33} &= f_{33} = \frac{r_{r} p_{6}}{I_{6}} - \frac{r_{p} p_{44}}{I_{44}} - \frac{r_{r} p_{52}}{I_{52}} \\ \dot{q}_{34} &= f_{34} = \frac{r_{s} p_{6}}{I_{6}} + \frac{r_{p} p_{49}}{I_{49}} - \frac{r_{r} p_{52}}{I_{52}} \\ \dot{q}_{35} &= f_{35} = \frac{r_{r} p_{6}}{I_{6}} - \frac{r_{p} p_{49}}{I_{49}} - \frac{r_{r} p_{52}}{I_{52}} \\ \dot{q}_{36} &= f_{36} = \frac{r_{s} p_{6}}{I_{6}} + \frac{r_{p} p_{49}}{I_{49}} - \frac{r_{s} p_{54}}{I_{54}} \\ \dot{q}_{53} &= f_{53} = \frac{P_{52}}{I_{52}} \\ \dot{q}_{57} &= f_{57} = N \frac{p_{54}}{I_{54}} - \frac{p_{59}}{I_{59}} \end{aligned}$$

$$(3-13)$$

将方程组(3-12)和(3-13)写成式(3-6)的形式**X** = **AX** + **BU** 其中,状态变量矩阵**X**为

 $\mathbf{X} = \left[\mathbf{P} \stackrel{:}{:} \mathbf{Q}\right]^{T} = \left[p_{2} \ p_{6} \ p_{39} \ p_{44} \ p_{49} \ p_{52} \ p_{54} \ p_{59} \ \stackrel{:}{:} \ q_{4} \ q_{31} \ q_{32} \ q_{33} \ q_{34} \ q_{35} \ q_{36} \ q_{53} \ q_{57}\right]^{T};$

A矩阵为

由上面方程易知: *m*=*a*+*b*=8+9=17, 故 A 矩阵有 2×8=16 个共轭复根,分别为:

$$\begin{array}{ll} \lambda_1 = 7.92 e^{-15} - 11.06 i & \lambda_2 = 7.92 e^{-15} + 11.06 i \\ \lambda_3 = 12.16 e^{-15} - 22.41 i & \lambda_4 = 12.16 e^{-15} + 22.41 i \\ \lambda_5 = 239.18 e^{-15} - 106.00 i & \lambda_6 = 239.18 e^{-15} + 106.00 i \\ \lambda_7 = -65.50 e^{-15} - 575.76 i & \lambda_8 = -65.50 e^{-15} + 575.76 i \\ \lambda_9 = 42.97 e^{-15} - 956.88 i & \lambda_{10} = 42.97 e^{-15} + 956.88 i \\ \lambda_{11} = -108.56 e^{-15} - 956.88 i & \lambda_{12} = -108.56 e^{-15} + 956.88 i \\ \lambda_{13} = -56.90 e^{-15} - 1137.78 i & \lambda_{14} = -56.90 e^{-15} + 1137.78 i \\ \lambda_{15} = -15.54 e^{-15} - 10009.59 i & \lambda_{16} = -15.54 e^{-15} + 10009.59 i \end{array}$$

根据 A 矩阵的 16 个共轭特征复根,可以得到传动系统的前 8 阶固有频率和其对应的 主振型,如表 3-2 所示。

固有		λ_2	λ_4	λ_6	λ_8	λ10	λ12	λ_{14}	λ16
频率		11.06i	22.41i	106.00i	575.76i	956.88i	956.88i	1137.78i	10009.59i
	<i>p</i> 振型 ●	-1.00E-0	-8.07E-1	-4.10E-1	-3.92E-2	0.00E-0	0.00E-0	-7.97E-3	6.14E-7
		-4.04E-3	1.62E-2	2.88E-1	8.25E-1	0.00E-0	0.00E-0	6.55E-1	-3.91E-3
		4.64E-5	4.27E-3	-8.88E-3	9.40E-2	2.64E-1	-6.81E-1	-1.34E-1	-2.47E-3
		4.64E-5	4.27E-3	-8.88E-3	9.40E-2	-6.72E-1	7.10E-1	-1.34E-1	-2.47E-3
		4.64E-5	4.27E-3	-8.88E-3	9.40E-2	4.08E-1	-2.83E-2	-1.34E-1	-2.47E-3
振		-1.02E-2	-3.45E-2	8.65E-1	-5.39E-1	0.00E-0	0.00E-0	-7.19E-1	-6.74E-5
		-7.88E-5	8.97E-3	4.32E-5	5.19E-4	0.00E-0	0.00E-0	-7.71E-4	9.96E-1
型		-5.16E-3	5.89E-1	3.08E-3	-2.35E-2	0.00E-0	0.00E-0	5.90E-3	-8.83E-2
	q 振型 ●	1.89E-6i	3.10E-6i	7.44E-6i	3.86E-6i	0.00E-0	0.00E-0	1.55E-6i	-1.05E-9i
矢		7.65E-9i	1.23E-8i	7.85E-9i	-2.51E-7i	8.03E-7i	-2.07E-6i	-6.77E-7i	-5.63E-10i
		7.64E-9i	1.17E-8i	1.38E-8i	-5.95E-7i	-8.03E-7i	2.07E-6i	2.93E-7i	1.57E-7i
量		7.65E-9i	1.23E-8i	7.85E-9i	-2.51E-7i	-2.04E-6i	2.16E-6i	-6.77E-7i	-5.63E-10i
		7.64E-9i	1.17E-8i	1.38E-8i	-5.95E-7i	2.04E-6i	-2.16E-6i	2.93E-7i	1.57E-7i
		7.65E-9i	1.23E-8i	7.85E-9i	-2.51E-7i	1.24E-6i	-8.61E-7i	-6.77E-7i	-5.63E-10i
		7.64E-9i	1.17E-8i	1.38E-8i	-5.95E-7i	-1.24E-6i	8.61E-7i	2.93E-7i	1.57E-7i
		1.02E-6i	1.70E-6i	-9.01E-6i	1.03E-6i	0.00E-0	0.00E-0	6.97E-7i	7.44E-12i
		3.54E-7i	-5.99E-6i	-2.03E-8i	-4.48E-8i	0.00E-0	0.00E-0	3.37E-8i	-4.95E-6i

表 3-2 固有频率及其对应的主振型

Tab.3-2 Natural frequency and the corresponding main modal shape

为了更直观的观察传动系统的振动形态,绘制其两类主振型及其相应的同形模态,见 图 3-18、图 3-19。图 3-18 中的位移模态是通过式(3-10)简单的矩阵变换得到的;而图 3-19 中的力模态是通过式(3-11)变换得到的。





Fig.3-18 P modal shape and displacement modal of the drive train



图 3-19 传动系统的q 振型和力模态



3.4.3 行星齿轮系的位移模态

传动系统中齿轮箱作为一个构造复杂的子系统,在外部复杂激励的条件下,其振动形态往往比较复杂。而在结构振动中,高阶模态能量占比太低,对整个结构振动影响不大,故为了更直观的观察齿轮箱的振动形态,绘制了齿轮箱中行星齿轮系的前4阶位移模态,见图 3-20。





从上述各图,可以看出:

1)在这些低阶模态中,整个齿轮系的扭转形态都比较复杂,各个部件都按某一方向
 和角度进行扭转;

2) 一阶模态中太阳轮的旋转方向与行星架和内齿圈的旋转方向相同,而与各行星轮
 的旋转方向相反,而对于一阶模态以上的高阶模态,各部件间扭转方向的关系就比较复杂;

3) 在同一阶模态中各个行星轮的扭转方向和扭转位移都是一致的。

3.5 本章小结

本章主要对风力机系统中实现能量转换的重要装置一传动系统进行键合图建模分析, 尤其是传动系统中齿轮箱的建模研究。具体的研究内容包括以下几个方面:

 1)简单阐述了常见的风力机传动系统及所含齿轮箱的物理组成和内部结构。对风力 机传动系统采用等效集中质量法进行了集中惯量处理,并假设齿轮箱各个齿轮只考虑扭转 和啮合作用。

2)建立了传动系统的键合图模型。从传动链的物理结构出发,将传动系统细分为三个部分:低速轴侧,齿轮箱和高速轴侧,对它们分别进行了键合图建模,并耦合得到了传动系统的键合图模型;接着对齿轮箱进行了简单的仿真验证与分析。

3)利用键合图模态分析方法对传动链进行了模态分析。先简单论述了键合图模态分析方法的基本理论,在此基础上,建立了不含阻尼的传动链键合图模型并得到了系统的状态方程,进而分析了传动链的固有频率以及对应的第一类模态和第二类模态及其同形模态。为了更直观的观察系统的振动形态,绘制了齿轮箱平行轴齿轮的前四阶模态振型。

第4章 笼型异步发电机的键合图建模分析

发电机作为风力发电系统中一个核心部件之一,是把由风轮得到的转速,通过增速齿 轮箱升速后传递给发电机均匀运转,把机械能转换为电能的装置。作为一种不同能量域转 换的装置,发电机涉及到机械能、电能和磁能之间的相互转换,显然,可以利用键合图方 法对其进行建模分析。

国内外不少学者利用键合图理论对直流电机、交流电机(包括同步电机、异步电机) 进行了键合图建模研究和相应的仿真分析^[48-49],其中对感应发电机的研究则受到了广泛的 关注。文献[9]利用IC多通口储能场^[37]建立了异步发电机的键合图模型,并对变频器和LC 滤波器进行键合图建模及其控制研究,IC场尽管能很好的描述机电磁之间的耦合关系,但 其不能明显的表示电压、电流、转速和磁链之间的关系,所建立的模型便失去了键合图建 模的优点。在一般的三相静止坐标系下,异步发电机的动态数学模型是一个多变量、非线 性、强耦合的八阶系统,其分析与求解十分困难,因此,在实际应用中必须设法予以简化 处理。

对发电机进行坐标变换简化处理,本章首先阐述坐标变换的原理并得到相应的变换矩阵,然后建立变换矩阵的键合图模型,并利用 20-sim 软件和 Matlab/Simulink 软件进行仿真验证;根据电路键合图建模的步骤建立笼型三相异步发电机的键合图模型,并利用 20-sim 软件进行仿真验证。

4.1 三相异步发电机的物理模型

异步发电机主要包括笼型感应发电机、绕线式转子异步发电机和双馈式感应发电机 等。与其他旋转电机相比,异步发电机的结构简单,运行可靠,制造、使用和维护方便, 价格低廉,效率较高,是当今应用最广、需求量最大的一种电机^[50]。而笼型感应电机不仅 具有以上优点,且在接入电网时,更经济、更方便,所以本文以笼型三相异步发电机为研 究对象,进行分析研究。

为便于分析,对笼型三相异步发电机作如下理想化假设^[51]:

1)忽略空间磁势的高次谐波分量和齿槽效应,设三相绕组对称,在空间上三相相位 互差 120°,产生的磁动势沿气隙周围按正弦规律分布;

2) 定子和转子结构的磁性材料都是各向同性的;

3) 忽略温度和频率变化对电机参数的影响,不计发电机的铁芯损耗;

4)转子绕组折算至定子侧,折算前后的每相匝数都相等;

5) 忽略发电机磁滞效应和涡流损耗;

6) 忽略磁路的非线性饱和, 各绕组的自感和互感都是恒定的。

基于以上假设,可以得到三相对称异步发电机的物理模型,如图 4-1 所示。



图 4-1 三相对称异步发电机的物理模型

Fig.4-1 Physical model of symmetrical 3-phase asynchronous generator

图中,定子三相绕组轴线 A、B、C 在空间中是固定的,故定义为三相静止坐标系,以 A 轴为参考坐标轴;转子绕组轴线 a、b、c 随转子旋转,转子 a 轴和定子 A 轴间的电角度 θ , 为空间角位移变量; U_A 、 U_B 、 U_C 和 i_A 、 i_B 、 i_C 分别表示定子绕组的三相电压和三相电流; U_a 、 U_b 、 U_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 分别表示转子绕组的三相电压和三相电流; N_s 和 N_r 分别表示定、 转子绕组的线圈匝数; r_s 、 r_r 分别表示定、转子绕组的电阻; ω_r 、 ω_R 、 γ 分别表示转子 的电角速度、d-q坐标轴相对于定子的角速度和d 轴与A轴的夹角($\dot{\gamma} = \omega_R$)。

4.2 坐标变换和变换矩阵的键合图模型

由于异步发电机本身的非线性,强耦合性以及高阶次,使得传统的分析方法很难应用 于对异步发电机的精确分析^[52],尤其对于数学模型中复杂的电感矩阵,影响磁通和受磁通 影响的因素太多。因此,需采用坐标变换的方法加以改造,使变换后的数学模型容易处理 一些。下面,对电机建模中最常用的坐标变换进行分析,建立相应变换矩阵的键合图模型, 并对矩阵的模型进行对比验证。

4.2.1 坐标变换

坐标变换在电路上是一种线性变换,在形式上是一种数学变换,但实质上是能量的变换,变换过程中必须遵守以下变换原则^[53]:

1)磁动势等效原则。电机是通过气隙磁场传递能量的,为使变换前后电机的能量关系不变,则在不同坐标系下产生的磁势是完全一致的。

2) 功率不变原则。坐标变换前后所计算的功率、转矩相等。

3) 电压变换和电流变换相同原则。这一约束原则保证了变换矩阵的唯一性。

常见的坐标变换有: *A*-*B*-*C* 三相静止坐标系到α-β两相正交坐标系的变换,再到任意 旋转*d*-*q*坐标系的变换。

异步发电机含有三相定、转子绕组,在进行坐标变换时,常常对定、转子变量采用上述相类似的坐标变换。而对笼型异步发电机进行分析时,由于转子绕组一侧短路,故只考虑定子变量的坐标变换,下文中讨论的坐标变换也仅是针对定子变量。

4.2.1.1 三相静止与两相正交间的坐标变换

三相静止 *A-B-C* 坐标系与两相正交*α-β*坐标系之间的变换,也称为 Clarke 变换。利 用这一变换,可以将一个对称的三相电机模型等效为一个正交的两相电机模型。



图 4-2 三相 A-B-C 坐标系和两相 α - β 坐标系示意图

Fig.4-2 Diagram of A-B-C coordinate system and $\alpha - \beta$ coordinate system

图 4-2 中, A 轴与 α 轴重合, N₂、N₃分别表示两相电机和三相电机中每相绕组的有效 匝数,各相磁动势均为有效匝数及其瞬时电流的乘积,由

1) 磁动势等效原则,得到

$$\begin{cases} i_{\alpha} = \frac{N_3}{N_2} (i_A - \frac{i_B}{2} - \frac{i_C}{2}) \\ i_{\beta} = \frac{N_3}{N_2} \frac{\sqrt{3}}{2} (i_B - i_C) \end{cases}$$
(4-1)

为方便之后求反变换,将变换矩阵表示成可逆的方阵,在两相系统上人为地增加一项零轴 磁动势 *N*,*i*₀,并定义

$$N_2 i_0 = K \cdot N_3 (i_A + i_B + i_C) \tag{4-2}$$

2) 电压变换和电流变换相同原则,得到

$$\begin{cases} U_{\alpha} = \frac{N_{3}}{N_{2}} (U_{A} - \frac{U_{B}}{2} - \frac{U_{C}}{2}) \\ U_{\beta} = \frac{N_{3}}{N_{2}} \frac{\sqrt{3}}{2} (U_{B} - U_{C}) \\ U_{0} = K \cdot \frac{N_{3}}{N_{2}} (U_{A} + U_{B} + U_{C}) \end{cases}$$
(4-3)

由式(4-1)和式(4-2)可以得到:

三相功率: $P_3 = U_A i_A + U_B i_B + U_C i_C$ (4-4)

两相功率:
$$P_2 = U_{\alpha} i_{\alpha} + U_{\beta} i_{\beta} + U_0 i_0$$
(4-5)

3) 功率不变原则,得到

$$P_{3} = P_{2} \Rightarrow \frac{N_{3}}{N_{2}} = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{2}}$$
(4-6)

于是由式(4-1)~式(4-6)可得到两个坐标系间的电流关系如下:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_{0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A} \\ i_{B} \\ i_{C} \end{bmatrix}$$
(4-7)

则三相静止坐标系到两相正交坐标系的变换和其逆变换的变换矩阵分别为:

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \qquad C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{vmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix}$$
(4-8)

对于上式中的变换矩阵 C 和 C⁻¹ 同样适用于其他电磁变量(电压和磁链)的变换。

4.2.1.2 两相静止与两相任意旋转间的坐标变换

此处的坐标变换是指两相静止 α - β 坐标系和两相任意旋转d-q坐标系之间的变换。



图 4-3 两相 α - β 坐标系和两相d-q坐标系示意图

Fig.4-3 Diagram of $\alpha - \beta$ coordinate system and d - q coordinate system

如图 4-3, *u* 表示进行坐标变换的电磁变量,如电压、电流或磁链。根据坐标变换的三 个原则,可以得到α-β坐标与*d*-q坐标下变量的变换关系:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix}$$
(4-9)

则两相静止坐标系到两相任意旋转坐标系的变换和其逆变换的变换矩阵分别为:

$$P = P(\gamma(t)) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4-10)

4.2.1.3 三相静止与两相任意旋转间的坐标变换

电磁变量在三相静止 A-B-C 坐标系与两相任意旋转 d-q 坐标系之间的变换存在如图 4-4 所示的关系。



图 4-4 坐标系变换关系

Fig.4-4 The transformation relation for different coordinate system

由上图知,由三相静止坐标系到两相任意旋转坐标系上的变换,可分为两步:即先将 *A-B-C*坐标系变换到静止α-β坐标系,然后从α-β坐标系变换到*d*-q坐标系。第一步变 换采用*C*变换矩阵,第二步变换采用*P*变换矩阵。由所查阅的对于发电机研究的文献发现, 大多都是对*d*-q坐标系下的电机进行建模分析,为不失一般性,本文后续内容将对旋转 *d*-q坐标系下的电机进行键合图建模分析。为便于异步电机键合图建模的简化,由三相 *A-B-C*坐标系到两相*d*-q坐标系的变换仅由变换矩阵*M*便可实现,于是由上述坐标变换的 描述可得:

$$\begin{bmatrix} u_{d} \\ u_{q} \\ u_{0} \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} u_{A} \\ u_{B} \\ u_{C} \end{bmatrix}$$
(4-11)

$$M = C \cdot P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \gamma - \sin(\gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$
(4-12)

4.2.2 变换矩阵的键合图模型

4.2.2.1 变换矩阵的键合图建模

由 4.3.1 节可知, 三相静止 *A-B-C* 坐标系与两相任意旋转*d-q*坐标系之间的变换可通 过 *M* 变换一步实现, 变换后可以将三相变量缩减为两相变量。观察式(4-12)易知, 由于 角度 γ(*t*) 是变化的, 所以 *M* 矩阵是非定常矩阵, 则可以用键合图的基本元件一调制变换器 (MTF) 来表示 *M* 变换阵中与γ有关的时变元素, 利用变换器(TF)来表示其他值不变 的元素, 于是得到 *M* 矩阵的键合图模型如图 4-5 所示。



图 4-5 M 矩阵的键合图模型

Fig.4-5 Bond graph model of M matrix

0-结:

$$f_{A} = m_{11}f_{q} + m_{21}f_{d} + m_{31}f_{0}$$

$$f_{B} = m_{12}f_{q} + m_{22}f_{d} + m_{32}f_{0}$$
(4-13)

$$\int f_C = m_{13}f_q + m_{23}f_d + m_{33}f_0$$

$$[f_A \ f_B \ f_C]^T = M^T [f_d \ f_q \ f_0]^T$$
(4-14)

$$M^{T} = M^{-1} \tag{4-15}$$

从而

因为存在

$$[f_{d} \ f_{q} \ f_{0}]^{T} = (M^{T})^{-1} \mathbf{f}_{ABC} = (M^{-1})^{-1} \mathbf{f}_{ABC} = M \cdot [f_{A} \ f_{B} \ f_{C}]^{T}$$
(4-16)

1-结:

即

$$\begin{cases} e_d = m_{11}e_A + m_{12}e_B + m_{13}e_C \\ e_q = m_{21}e_A + m_{22}e_B + m_{23}e_C \\ e_0 = m_{31}e_A + m_{32}e_B + m_{33}e_C \end{cases}$$
(4-17)

由式(4-16)和式(4-17)知流变量和势变量均满足式(4-11)的变换形式,显然,所 建立的 *M* 变换矩阵的键合图模型能正确描述坐标系的变换关系。

对于三相对称异步电机,其输入势变量(电压)满足

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0 \tag{4-18}$$

对图中的 0-结和 1-结进行分析得

而

$$m_{31} = m_{32} = m_{33} = 1/\sqrt{3} \tag{4-19}$$

则由式(4-17)中的第三个式子可以得出 e₀ = 0,即经 M 变换后 d - q 坐标系上零轴分量等于 0,故在键合图模型中可以忽略 e₀对应的 1-结,得到 M 变换矩阵的键合图简化模型如图 4-6 所示。



图 4-6 M 变换矩阵的键合图简化模型

Fig.4-6 Simplified bond graph model of M matrix

4.2.2.2 变换矩阵键合图模型的验证

利用 20-sim 软件对图 4-6 所示的 *M* 变换矩阵的键合图模型进行仿真,其结果如图 4-7 所示,并同时利用 Matlab/Simulink 对式(4-17)进行建模仿真,得到如图 4-8 所示的仿真结果,通过两种仿真结果的对比来验证 *M* 变换矩阵的正确性。

仿真中: 设静止三相对称电压 U_A 、 U_B 、 U_c 的幅值均为 220V; 各相电压相位差为120°; 频率为 50Hz; 任意旋转转速 ω_B 为 251 *rad* / *s*, 即 $\gamma = 251t$; 仿真步长均为 0.0001。

由图可知,通过对两种模型的仿真,最后得到的两相电压*U_d*和*U_q*它们的幅值 (269.445V)和频率完全一致,说明所建的*M*变换矩阵的键合图模型是完全正确的。







4.3 笼型异步发电机键合图模型

通过查阅大量的文献发现,文献中涉及到的电机键合图模型大多仅是直接给出或从数 学模型出发构建出来的,而下文将依据绪论中的建模框架对电机的键合图建模过程进行详 细的阐述。

4.3.1 笼型异步发电机键合图模型

4.3.1.1 d-q坐标系下笼型异步电机的等效电路

为方便建模与分析,本文在研究笼型三相异步发电机内部电磁和机械过程时,以电动



机惯例进行分析。d-q-0坐标系下异步电机的等效电路^[54],如图 4-9 所示。

图 4-9 d-q-0 坐标系下的异步电机等效电路

Fig.4-9 Equivalent circuit of asynchronous motor in *d-q-0* coordinate system 图中带"′"的参量或变量是相对定子绕组而言的,即转子绕组折算至定子侧后的相 关量,其中转子的电阻、漏感、电压、磁链和电流与折算前的量存在如下关系:

$$r_{r}' = (N_{s} / N_{r})^{2} r_{r}$$

$$L_{lr}' = (N_{s} / N_{r})^{2} L_{lr}$$

$$U_{r}' = (N_{s} / N_{r}) U_{r}$$

$$\lambda_{r}' = (N_{s} / N_{r}) \lambda_{r}$$

$$i_{s}' = (N_{s} / N_{s}) i_{r}$$
(4-20)

根据 4.2 节的假设(4)可知 $N_s = N_r$,则上式中带上标"'"的参量与不带上标的参量相等,所以在后续分析中,相关参量不再带上标"'"。

从图中可以看出,电机定、转子的零序电路彼此分离,他们都不涉及机电能量转换。 在笼型异步电机中,转子侧由于端环短路,则转子电压U_(a, b, c),总是为零。此外,如果每 相定子瞬时电流的和为零,定子阻抗和磁通分布平衡,那么电机中就没有零序电流分量, 即*i*_{0s} = 0, *i*_{0r} = 0。所以,在对转子侧连接机械负载后的分析中就没有必要考虑零序电路。

将笼型异步电机分为三个部分:电磁部分、机电耦合部分和机械部分,如图 4-10 所示。



图 4-10 d-q坐标系下笼型异步发电机系统图

Fig.4-10 System diagram of cage asynchronous generator in *d-q* coordinate system

图中, i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} 为d、q轴上定、转子绕组电流; U_{ds} , U_{qs} , U_{dr} , U_{qr} 为d、q轴上定、 转子绕组电压; λ_{ds} , λ_{qs} , λ_{dr} , λ_{qr} 为d、q轴上定、转子磁链; L_{ls} , L_{lr} , L_{sr} 分别为定子漏感,转 子漏感,同轴定转子间的互感; P_n 为电机极对数; T_{em} , T_l 为电磁转矩和负载转矩; R为机械 阻尼; θ 为转子瞬时角位置; ω 为转子机械转速($\omega = \dot{\theta}$)。

4.3.1.2 笼型异步发电机的键合图建模

根据第二章中电系统和机械系统的键合图建模步骤,对上图进行建模:

(1) 电磁部分:

a 轴电路键合图模型,如图 4-11 所示。





Fig.4-11 Bond graph model of d-axis circuit

q轴电路键合图模型,如图 4-12 所示。



图 4-12 q 轴电路键合图模型

Fig.4-12 Bond graph model of q-axis circuit

在上面的两个图中,半箭头方向表示功率流向,左右两侧1-结分别表示相应坐标轴上 的定转子电流。

(2) 机电耦合部分:

由于旋转磁场的作用,使电机转子以电角速度 ω,进行转动,转子在磁场中受力所产生的电磁转矩拖动系统转动而带动外接的机械负载运行,在此,电磁转矩作为耦合参量使电机的电磁部分和机械部分联系起来,则机电耦合部分的键合图模型,如下图 4-13 所示。





图 4-13 机电耦合部分键合图模型

图 4-14 机械部分键合图模型

Fig.4-13 Bond graph of Electromechanical coupling part Fig.4-14 Bond graph of mechanical part 图 4-13 中,由于机电耦合部分涉及电和机械两种不同的能量域,所以利用键合图元件
一调制回转器(MGY)来描述电流与转矩、转速与电压之间的关系。

(3) 机械部分:

该部分又叫电力拖动系统,由键合图方法可以很简单的将其描述为图 4-14 所示的模型。图中,J表示机组的转动惯量;势源 Se 表示负载转矩,"-"号表示与电磁转矩方向相关,即阻转矩。

对电磁部分,由定转子间的相互作用,可以得到如下的磁链方程

$$\lambda_{ds} = L_{s}i_{ds} + L_{sr}i_{dr}$$

$$\lambda_{qs} = L_{s}i_{qs} + L_{sr}i_{qr}$$

$$\lambda_{dr} = L_{r}i_{dr} + L_{sr}i_{ds}$$

$$\lambda_{ar} = L_{r}i_{ar} + L_{sr}i_{as}$$
(4-21)

式中 L. 一定子绕组自感;

L,一转子绕组自感。

而且

$$L_{s} = L_{ls} + L_{sr}, \quad L_{r} = L_{lr} + L_{sr}$$
 (4-22)

由以上两式和图 4-11、图 4-12 可知,电磁部分d、q轴之间存在流(电流)和势($\lambda \omega_R$)的转换关系,且 ω_R 是变化的,所以可以用键合图元件—调制变换器(MGY)来表示。将电机三个部分的键合图进行耦合,再与变换矩阵相连,可以得到图 4-15 所示的笼型异步发电机键合图模型。



图 4-15 任意旋转 d-q坐标系下的笼型异步发电机的键合图模型

Fig.4-15 Bond graph model of cage asynchronous generator in *d-q* coordinate system

图中,带虚线的箭头表示调制回转器模数中的时变参数,其中有旋转*d-q*坐标系的旋转速度 ω_R 和电流 (i_{ds} 、 i_{dr} 、 i_{qs} i_{qr})。I 元件有七个,其中五个具有积分因果关系,而电磁部分含有四个积分因果关系,表示该部分的数学模型由四个状态方程组成,同时,这些 I 元件与 1-结相连,说明该模型下电压方程只有四个,比静止三相坐标系下的电压方程少了两个,这就达到了坐标变换的目的。

4.3.2 由键合图模型列写电机数学模型

由图 4-15 知,该模型中电磁部分有两个 I 元件具有微分因果关系,按照具有微分因果 关系的键合图模型列写状态方程的步骤,对已作键合图增广的电磁部分进行分析,可以得 到如下方程: 对具有积分因果关系的I元件有

$$\dot{p}_{3} = D(L_{ls}i_{ds}) = e_{1} + \omega_{R}L_{s}f_{13} + \omega_{R}L_{sr}f_{19} - r_{s}f_{9} - e_{10}$$

$$\dot{p}_{4} = D(L_{ls}i_{qs}) = e_{2} - \omega_{R}L_{s}f_{12} - \omega_{R}L_{sr}f_{22} - r_{s}f_{15} - e_{16}$$

$$\dot{p}_{7} = D(L_{lr}i_{dr}) = \omega_{R}L_{r}f_{20} + \omega_{R}L_{sr}f_{14} - r_{r}f_{24} - \lambda_{qr}f_{25} - e_{23}$$

$$\dot{p}_{8} = D(L_{lr}i_{qr}) = \lambda_{dr}f_{27} - \omega_{R}L_{r}f_{21} - \omega_{R}L_{sr}f_{11} - r_{r}f_{18} - e_{17}$$
(4-23)

对具有微分因果关系的I元件有

$$e_{5} = e_{10} = e_{23} = D(L_{sr}f_{5})$$

$$e_{17} = e_{18} = e_{4} = D(L_{sr}f_{4})$$

$$f_{5} = f_{10} + f_{23} = i_{ds} + i_{dr}$$

$$f_{6} = f_{16} + f_{17} = i_{qs} + i_{qr}$$
(4-24)

将式(4-21)和式(4-22)代入式(4-23)和式(4-24)中,化简后得到电压方程为

$$D(\boldsymbol{\lambda}_{ds}) = U_{ds} + \boldsymbol{\omega}_{R}\boldsymbol{\lambda}_{qs} - r_{s}i_{ds}$$

$$D(\boldsymbol{\lambda}_{qs}) = U_{qs} - \boldsymbol{\omega}_{R}\boldsymbol{\lambda}_{ds} - r_{s}i_{qs}$$

$$D(\boldsymbol{\lambda}_{dr}) = (\boldsymbol{\omega}_{R} - \boldsymbol{\omega}_{r})\boldsymbol{\lambda}_{qr} - r_{r}i_{dr}$$

$$D(\boldsymbol{\lambda}_{qr}) = -(\boldsymbol{\omega}_{R} - \boldsymbol{\omega}_{r})\boldsymbol{\lambda}_{ds} - r_{r}i_{qr}$$
(4-25)

对机电耦合部分的 1-结进行分析有

$$e_{30} = P_n e_{29} = P_n (e_{26} - e_{27}) \tag{4-26}$$

则电磁转矩的方程为

$$T_{em} = P_n(i_{dr} \cdot (L_r i_{qr} + L_{sr} i_{qs}) - i_{qr} \cdot (L_r i_{dr} + L_{sr} i_{ds}))$$

= $P_n L_{sr}(i_{dr} i_{as} - i_{ar} i_{ds})$ (4-27)

对机械部分的I元件进行分析有

$$\dot{p}_{31} = e_{31} = JD(\omega) = e_{30} + e_{33} - Rf_{31}$$
 (4-28)

则电力拖动系统的运动方程为

$$T_{em} = T_l + J \frac{d\omega}{dt} + R\omega \tag{4-29}$$

由于存在变换器 TF,则有

$$\omega = \frac{\omega_r}{P_n} \tag{4-30}$$

则

$$T_{em} = T_l + \frac{J}{P_n} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{R\omega_r}{P_n}$$
(4-31)

式子中,符号D代表微分算子,即d/dt。

将式子(4-25)、(4-27)、(4-31)与文献[53,55]中的异步电机旋转坐标系下的状态方

程进行对比,可知它们是一致的,说明所建的笼型三相异步发电机键合图模型是正确的。

4.4 笼型异步电机仿真分析

利用 20-sim 软件建立如图 4-15 所示的笼型三相异步发电机的键合图模型,对所建立的模型进行仿真验证,电机参数如下:

 $P_n = 2; \quad J = 0.3 \text{kg} \cdot \text{m}^2; \quad R = 0.005 \text{N} \cdot \text{s/m}; \quad r_s = 0.435 \Omega; \quad r_r = 0.816 \Omega; \quad L_{sr} = 0.0832 \text{H};$ $L_s = L_r = 0.0856 \text{H}; \quad L_{ls} = L_{lr} = 0.0024 \text{H}; \quad L_{sr} = 0.0832 \text{H} \circ$

仿真过程中采用 4 阶 Runge-Kutta 方法,固定步长为 0.0001s。

对电机进行两种运行特性的仿真分析,其过程如下:

4.4.1 电机空载启动空载运行时的仿真

设输入势源为 220V, 50Hz 的三相工频电压源,经同步旋转(即 ω_R = 314 rad / s)正 交变换后与电机相连,模型中负载阻转矩取零,表示电机空载。仿真结果如图 4-16 所示。





图 4-16 电机空载启动、空载运行时的特性曲线

Fig.4-16 Characteristic curve of electrical machine at starting and operating with no-load

由图(4-16)中(a)和(b)可以看出,电磁转矩开始时达到最大值,后脉动地减小, 0.3s后平稳地减小并在1s时接近于零;而电机转速首先经过短暂的脉动后,平滑地达到稳 态值(即最大机械转速)。图(c)和图(d)中,定子和转子电流变化趋势是一致的,起始 时都比较大,后来逐渐衰减,最后定子电流稳定在一个较小值,而转子电流近似为零。图 (e)中,定子电压保持不变,这与实际是相符的;而转子电压与转子电流的变化趋势保持 一致。需要注意的是,由于电机未采用任何控制系统,所以各特性曲线在起始阶段均有一 定的脉动现象,这可以通过采用相应的控制系统来减小或消除。

4.4.2 电机空载启动负载突变运行时的仿真

采用相同的电压源对电机空载启动、负载突变运行特性进行仿真分析,其中在 6s 时负载由 0 突加到 45N.m, 3s 后负载再突降到 10N.m,电机的运行情况如图 4-17 所示。



(b) 定子电流波形



Fig.4-17 Characteristic curve of electrical machine at starting with no-load and operating with load change

在图 4-17 中,由各特性曲线的局部放大图可以清晰地看出,在电机空载启动阶段,电机的转矩、转速、定子电流和转子电流、定子电压和转子电压的变化情况与图 4-16 所示的结果是相同的。

由图(a)知,在 6s时由于加入负载,使得电机输出的电磁转矩增大且增大的幅值与 负载幅值相等,而电机机械转速相应地减小。9s时由于负载减小到10N.m,电机输出转矩 便又减小,同时转速逐渐增大,最后电机稳定运行,电机输出转矩和转速也达到恒定值。 对于定子电流和转子电流,它们的变化随着负载的突加与突降,相应的增加与减小,且它 们的变化情况是一致的。由图(c)和图(d)对比可知,随着负载的变化,转子电压的变 化与电流的变化是一致的,只是值的大小不同;而定子的电压却保持不变。在负载的加入 与释放过程中,电机的特性曲线变化均有滞后现象,这与实际是相符的。

4.5 本章小结

本章以绪论中提到的电机建模的框架为主线,对笼型三相异步发电机在任意旋转坐标 系下的键合图建模进行了研究。主要的内容包括以下三个方面:

1)建立了坐标变换矩阵的键合图模型。先对三相异步发电机的物理模型进行了简单的叙述,在此基础上,详细讲解了不同坐标系之间的变换关系;接着建立了由三相静止 *A-B-C*坐标系变换到两相任意*d-q*旋转坐标系的变换矩阵的键合图模型,并证明了模型的正确性。

2) 建立了*d-q*旋转坐标系下的笼型异步发电机的键合图模型。从三相异步发电机的等效电路图入手,建立了电机各部分的键合图模型,与变换矩阵进行耦合,最终得到了完整的笼型异步发电机的键合图模型;然后推导了对应的数学模型,说明了键合图模型的正确性。

3) 对电机的运行特性进行了仿真分析。利用 20-sim 软件对电机的两种不同运行特性 进行了数字仿真, 仿真结果进一步验证了所建的电机键合图模型的正确性。

第5章 风力发电系统的键合图模型

风力发电系统的运行过程是一个多因素相互耦合的过程,涉及到风场风速特性、空气动力学、结构动力学、传动链动力学、电机动力学以及控制等因素^[56],在研究风力发电机组内在的动态特性时,建立合理而正确的风力发电机组系统动力学模型,将具有十分重要的意思,同时也为风力发电机组整机系统设计打下了基础。本章主要是在前述章节的基础上,研究风力机系统中其它子系统的键合图建模,并建立风力机整机系统的键合图模型。

5.1 其他子系统的键合图模型

本文所讨论的风力机系统是在狭义的风电系统上简单的考虑了变桨调节机构,是由几 个子系统模型耦合而成的,其中包括风轮气动模型、塔架模型、传动链模型、发电机模型 和电网模型,再加上变桨机构模型。它们相互联系,用键合图通口键将各子系统键合在一 起可以构成如图 5-1 所示的风力机系统耦合模型。本节在分析变桨机构原理,风轮气动原 理和塔架结构的基础上,建立它们的键合图模型,并与传动链和发电机键合图模型相结合, 最后分析风力机整机系统的键合图建模。



图 5-1 风力机系统耦合模型

Fig.5-1 Coupling model of wind turbine system

5.1.1 风轮气动键合图模型

风轮是把风的动能转变为机械能的重要部件,它由两只(或更多只)螺旋桨形的叶片 组成,而叶片是风力发电机接受风能的最主要部件,当风吹向叶片时,它从风中捕获风能 将风速转变为风力,再转变为转矩,通过传动链使发电机发电,从而实现风能转换为电能 的过程。在该过程中,叶片往往产生具大的转矩,通过齿轮箱的传递后,最终转变为带动 发电机转动的小转矩,同时叶片具有小旋转速度而通过齿轮箱后使发电机快速旋转并产生 电能。依键合图理论知识,得知该过程实质上是势变量与流变量在各组件间的转换与传递 的过程,并在过程中始终保证能量守恒。

由上述分析知,空气动力学键合图模型就是要利用键合图方法描述风转变为推力和扭矩的过程,即流变量转变为势变量的过程,也即风能转变为机械能的过程。下面利用空气动力学知识,对建立风轮气动键合图模型中运用到的风能,风能利用系数*C_p*,气动转矩*T_{aero}*和轴向推力*F_r*进行简单的介绍。

一、基本概念

(1)风能W^[50]。空气流动产生的动能。

由流体力学知识可以得到气流的动能为:

$$W = \frac{1}{2}mv_0^{\ 2} \tag{5-1}$$

式中 *m*一气体的质量, kg;

 v_0 一风轮上游气体的瞬时速度, m/s。

设单位时间内气流流过风轮旋转平面的气体的体积为V,则

$$V = Av_0 \tag{5-2}$$

$$A = \pi R_{rot}^2 \tag{5-3}$$

该体积的空气质量为

$$m = \rho V = \rho A V \tag{5-4}$$

式中 ρ 一空气密度, kg/m³;

A一风轮扫掠面积, m^2 。

由式(5-1)~式(5-4)得气流所具有的动能为

$$W = \frac{1}{2} \rho \pi R_{rot}^2 v_0^3$$
 (5-5)

从式(5-5)可以看出,风能的大小与空气密度、风轮的半径R_{rot}大小及其风速有关。

(2)风能利用系数*C_p*。扫过风力机的风的动能并没有完全被风轮吸收,只是其中一部分被风力机的风轮转化为了机械能。根据Rankine-Froude理论^[57],在风速给定的条件下,风力机从风中捕获的气动功率^[58]为:

$$P_{a} = \frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} \rho \pi R_{rot}^{2} v_{0}^{3} C_{p}$$
(5-6)

式中 C_p —风能利用系数,其最大值 $C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0.593$,称为贝茨极限。

在此引入一个量叫叶尖速比λ,也称为尖速比,是指风轮叶片的叶尖速度与风速之比。

用于表示风轮在不同风速时的运动状态。

$$\lambda = \frac{\omega_{rot} R_{rot}}{v_0} \tag{5-7}$$

其中 ω_{mt} 一风轮角速度, rad/s。

风能利用系数与叶尖速比和桨距角有关,即

$$C_p = C_p(\lambda, \theta) \tag{5-8}$$

其中 θ 一桨距角, deg。

对于变桨距风力机,风能利用系数 C_p 与叶尖速比 λ 和桨叶的桨距角 θ 成非线性关系,采用逼近法可近似地描述式(5-8)的风能利用系数^[59-60]:

$$C_{p}(\lambda,\theta) = C_{1}(C_{2}\Lambda - C_{3}\theta - C_{4}) \cdot exp(-C_{5}\Lambda)$$
(5-9)

$$\Lambda = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1}$$
(5-10)

式中, $C_1 = 0.22, C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4 = 5, C_5 = 12.5$ 。

由上述分析,我们可以得到 C_p 与 λ 和 θ 的关系曲线,如图 5-2 所示。



图 5-2 风能利用系数 $C_p(\lambda, \theta)$ 的特性曲线

Fig.5-2 C_p curve

由图可知,在保持 λ 值不变时,风能利用系数 C_p 随着桨距角 θ 的增大而逐渐减小。同时,在桨距角一定的情况下,有且只有唯一叶尖速比对应于风能利用系数的最大值 C_{pmax} ,该叶尖速比称为最佳叶尖速比 λ_{out} 。

(3) 风轮气动转矩 T_{aero} 。因为风轮功率=转矩(T)×角速度(ω),所以有:

$$T_{aero}\omega_{rot} = \frac{1}{2}\rho\pi R_{rot}^2 v_0^3 C_p(\lambda,\theta)$$
(5-11)

则风力机的气动转矩为

$$T_{earo} = \frac{\rho \pi R_{rot}^2 v_0^{\ 3} C_p(\lambda, \theta)}{2\omega_{rot}}$$
(5-12)

(4)风轮轴向推力 F_{T} 。由动量理论^[61]并引入风轮推力系数 C_{T} 知

$$F_T = \frac{1}{2} \rho \pi R_{rot}^2 v_0^2 C_T(\lambda, \theta)$$
(5-13)

其中, 推力系数 $C_r(\lambda, \theta)$ 与风能利用系数 $C_p(\lambda, \theta)$ 相似, 也与叶尖速比 λ 和桨距角 θ 有关系, 并存在与式(5-9)相类似的关系式。

二.、气动键合图模型

风作用于叶片产生使风轮转动的气动转矩和使塔架轴向振动的轴向推力,其键合图模型就是利用键合图元件将风与气动转矩和轴向推力的关系描述出来,而风在键合图理论中对应于流变量(风速),转矩和推力对应于势变量,则式(5-12)和式(5-13)可以写为

$$T_{earo} = \underbrace{\left(\frac{\rho \pi R_{rot}^2 v_0^2 C_p(\lambda, \theta)}{2\omega_{rot}}\right)}_{MGY1} v_0$$

$$E = \underbrace{\left(\frac{\rho \pi R_{rot}^2 v_0 C_T(\lambda, \theta)}{MGY1}\right)}_{V} v_0$$
(5-14)

 $\frac{2}{MGY^2}$

$$\begin{bmatrix} T_{earo} \\ F_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} MGY1 \\ MGY2 \end{bmatrix} [v_0]$$
(5-16)

最终可以用一个多通口调制回转器 MGY 来表示风轮气动键合图模型, 如图 5-3 所示。



图 5-3 风轮气动键合图模型

Fig.5-3 Aerodynamic bond graph model

由上述分析知,图中输入信号为桨距角heta和风轮转速 ω_{rot} 。

5.1.2 变桨机构的键合图模型

在风力机中变桨距执行机构通常由电机或者液压系统实现,并将其等效为一阶或二阶 系统,而在控制系统中二阶系统应用极为广泛,故本文将调桨系统等效为一个二阶系统, 其微分方程为:

$$\boldsymbol{\theta}_{ref} = T^2 \ddot{\boldsymbol{\theta}} + 2\boldsymbol{\zeta} T \dot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{\theta} \tag{5-17}$$

式中, θ_{ref} 和 θ 分别为参考桨距角和实际桨距角; $T = 1/\omega_n$ 为二阶系统的时间常数; ω_n 为二阶系统的无阻尼振荡频率或自然频率; ζ 为阻尼比。

上式与常见的质量-弹簧-阻尼系统运动方程的形式是一致的,即

$$F = M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx \tag{5-18}$$

如图 5-4 所示的质量-弹簧-阻尼系统,其键合图模型的构建十分简单,所以可以借助质量-弹簧-阻尼系统的键合图模型来构建变桨机构的键合图模型,如图 5-5 所示。



图 5-4 质量-弹簧-阻尼系统



图 5-5 变桨机构键合图模型

Fig.5-4 Mass-spring-damper systemFig.5-5 Bond graph model of pitching system对式(5-17)和式(5-18)进行比较,可以得到:

$$F = \theta_{ref}$$
, $M = T^2 = \frac{1}{\omega_n^2}$, $D = 2\zeta T = \frac{2\zeta}{\omega_n}$, $K = 1$

5.1.3 对比验证

利用 20-sim 软件和 Matlab/Simulink 软件对风轮气动键合图模型和变桨机构键合图模型进行对比验证。利用文献[61]中 5MW 风力机的有关数据,进行仿真分析。仿真参数为:

 $R_{rot} = 63 \text{m}, \ \rho = 1.225 \text{kg/m}^3, \ \omega_n = 0.88 \text{rad/s}, \ \zeta = 0.9, \ \theta_{min} = -5^\circ, \ \theta_{max} = -25^\circ, \ P_e = 5e6 \text{W}$

仿真风力机在额定转速下的变桨运行情况,设额定转速ω_{rot}为12.5r/m,额定风速为 12m/s,仿真过程中风速的变化见图 5-6 中 V0;由 Matlab/Simulink 得到的结果见图 5-7。 通过两图可以看出其仿真结果完全一致,即起始风速小于额定风速时,风力机未到达额定 功率,也无需进行桨距调节;在 6s 时风速发生阶跃变化上升至 13m/s,此时,风轮捕获的 功率超过了额定功率,经调桨后,使*C_p*减小,即适当减少了从风能中捕获的功率,最终风力机在较小的*C_p*值下作恒功率运行,这与变桨调节要达到的目的是一致的。经过对比得知,所建风轮气动键合图模型和变桨机构键合图模型是正确的。





5.1.4 塔架的键合图模型

一、塔架键合图模型

由风力机结构示意图,图 5-8 可看出,塔架是主要的承重机构,用来支撑整个风力发 电机组的重量,当风力发电机组运行时,塔架将受到随机的风载荷、机组自重、偏心距等 复杂载荷作用,其中塔架顶端水平方向产生较大位移,会引起塔架结构的激励振动,而且 使作用于风轮上的风速小于风轮上游的来流风速,文中为便于反映这一实际存在的反馈效 果,对塔架建模时作如下理想假设:

1) 塔架的运动对机械系统没有影响,而仅仅改变整个系统的输入,如风速;

- 2) 基座对塔架的作用力为零,即输入的势变量 $S_{\rho} = 0$;
- 3) 塔架的扭转变形很小,只考虑塔架水平方向的运动。

根据牛顿运动定律,对塔架进行分析得到:

$$M_T \ddot{x} = F_T - D_T \dot{x} - K_T x \tag{5-19}$$

式中 M_{τ} 一塔架质量; x一塔架的水平位移; F_{τ} 一水平推力;

 D_{T} 一塔架运动阻尼; K_{T} 一塔架刚度。

由图 5-8,根据键合图建模方法可以很容易得到塔架运动的键合图模型,如图 5-9 所示。 对图中惯性元件 I 和容性元件 C 分析得到如下的状态方程:

$$\dot{p}_{4} = e_{4} = Se_{1} - R\frac{p_{4}}{I} - \frac{q_{3}}{C}$$

$$\dot{q}_{3} = f_{3} = \frac{p_{4}}{I}$$
(5-20)

将式(5-19)和式(5-20)进行对比可知两个式子是一致的,说明所建塔架键合图模型是正确的。









Fig.5-9 Bond graph model of tower motion

二、模型验证

利用 20-sim 软件建立如图 5-9 所示的塔架键合图模型,对塔架进行运动仿真;同时用 matlab 对式(5-19)求解,将所得的两种结果进行对比来验证所建键合图模型的正确性。利用文献[61]中塔架结构参数进行仿真,即

 $M_{_T} = 4.2278e5 \text{ Kg}$; $K_{_T} = 1.6547e7 \text{ N/m}$; $D_{_T} = 2.0213e3 \text{ N.s/m} \circ$

施加的轴向推力如图 5-10 中 F_T 所示,则用 20-sim 软件仿真得到的结果见图 5-10。 用 Matlab 求解得到的塔架顶端速度和水平位移,如图 5-11 所示。显然,图 5-10 和图 5-11 中速度和位移图形是完全相同的,由此证明了塔架运动的键合图模型是正确的。



图 5-11 Matlab 仿真结果

Fig.5-11 Simulation with Matlab

5.1.5 电网侧键合图模型

不同类型的发电机与电网的连接方式是不一样的,对于笼型异步发电机,这里采用直接并网法并网,即没有使用其他的电力电子设备。而并网运行的感应电机的电压一定是电网电压,其频率也一定是电网频率,其键合图描述,如图 5-12 所示。



图 5-12 电网侧键合图模型

Fig.5-12 Bond graph model of power grid

图中,U表示电网的电压幅值;三角函数信号 t_A , t_B , t_C 分别表示三相电压的变化,其中各相频率相同,且各相电压之间相差120°; U_A , U_B , U_C 表示三相对称电压。通过改变U和 t_A , t_B , t_C 可以模拟不同状况下的电网特性。

5.2 系统的键合图模型

在前面各章节,分别研究了风力发电系统的各子部件,子系统的键合图模型,将这些 子系统的键合图模型按图 5-1 的形式进行耦合连接,可以得到风力发电机整机系统的键合 图模型。由于风电系统本质上是一个能量转换装置,为保证图 5-1 中风力机整机系统各子 系统之间的连接符合实际运行情况,需保证部件各连接通口之间功率相等,这也是键合图 方法得以应用于多能域复杂系统的基本原理。

通过分析各子系统间的能量转换关系和系统的实际运行情况,利用子系统间的相关参量(耦合参量)得到与图 5-1 相对应的风力发电系统的键合图模型,如图 5-13 所示。由于 传动链被分为三个子部件,所以整机系统模型由八个部分组成:变桨机构模型、风轮气动 模型、塔架模型、高速轴模型、齿轮箱模型、低速轴模型、发电机模型、电网侧模型。


图 5-13 风力发电系统的键合图模型 Fig.5-13 Bond graph model of WECS (Wind Energy Conversion System)

图 5-13 中, 变桨机构模型采用图 5-5 所示的键合图模型; 气动模型采用图 5-3 的键合 图模型; 塔架模型采用了图 5-9 的键合图模型; 其他模型则是通过图 3-13、图 4-15 和图 5-12 中键合图模型的相互结合或变形得到。为便于与系统的实际物理模型相对比, 检验所 建键合图模型的正确性, 图中对各元件进行了标注, 且指定了它们的因果关系, 通过因果 关系我们可以直观分析系统中各元件之间的相互作用关系, 定性研究系统的动态特性。

5.3 本章小结

本章从复杂系统键合图建模的角度考虑,建立了风力发电系统的键合图模型。为完善风电整机系统的键合图建模,首先结合空气动力学的知识,推导出风与转矩和推力的关系,将风轮气动模型描述为一个多通口调制回转器;然后,考虑风力机的变桨调节,将变桨机构视为一个二阶系统,并对其进行了键合图描述;在此基础上对气动模型和变桨机构模型进行了对比验证;接着,考虑塔架水平方向的运动,建立并验证了其键合图模型;最后,研究了风电系统的整机键合图模型,为以后对风电系统的特性仿真和风力机的设计及其控制研究打下了很好的基础。

总结与展望

总结

风力发电系统的运行过程是一个多因素相互耦合的过程,涉及到空气动力学、结构动 力学、传动动力学、电机动力学以及控制等因素,基于系统的复杂性,建立便于系统动态 分析和设计的系统动力学模型是十分困难的,而建立合理并正确的风力发电系统的动力学 模型,不但有助于对风力发电系统内在动态特性的研究,同时也可为风电系统的设计打下 基础。本文从能量角度出发,考虑风力发电系统中风能、机械能、电磁能间的转变、传递、 转换关系及其各组成部件间的相互作用关系,采用键合图方法对这一多能域耦合的复杂系 统进行了建模分析。利用所建立的键合图模型,可以很方便地对风力发电整机系统的动态 特性进行直观、快速的分析。

对论文的主要工作内容总结如下:

详细介绍了键合图方法的基本理论知识,对键合图中常用术语和系统变量进行了阐述;介绍了常见基本元件的分类标准,并在此基础上分析了基本元件中势和流间的关系及其应用;阐明了基本元件的因果关系;总结了常见的电系统、机械系统的键合图建模方法;最后归纳了由键合图模型列写状态方程的步骤。

2. 从传动链的物理构造出发,将传动链分为低速轴侧、高速轴侧和齿轮箱等三个部分, 并分别进行键合图建模,对它们进行耦合得到了传动链的键合图模型;接着利用 20-sim 软 件对齿轮箱进行了验证与分析;对已建立的传动链键合图模型,结合键合图模态分析方法 的理论知识进行了模态分析,求出了传动系统的固有频率和绘制了相应的振型模态。

3. 在给出三相异步发电机物理模型的基础上,详细分析了不同坐标之间的变换关系, 建立了由三相静止A-B-C坐标系变换到两相任意旋转d-q坐标系的变换矩阵的键合图模 型,并验证了模型的正确性;接着从三相异步发电机的等效电路图入手,建立了发电机各 部分的键合图模型,并与变换矩阵进行耦合,最终得到了完整的笼型异步发电机的键合图 模型;然后推导了对应的状态方程,说明了所建模型的正确性;最后利用 20-sim 软件对电 机的两种不同运行特性进行了仿真分析。

 为完善风电整机系统的键合图建模,首先结合空气动力学的知识,将风轮气动模型 描述为一个多通口调制回转器元件;然后,将变桨机构视为一个二阶系统,进行了其键合 图模型;接着,考虑塔架水平方向的运动,建立了塔架水平运动的键合图模型;最后,探

65

讨了风力发电整机系统的键合图模型的建立。建立了风电系统的整机键合图模型,对进行 风电系统的特性仿真和风力机的设计及其控制研究具有重要意义。

展望

实际的风电系统是极其复杂的,在建立其整机模型时需要综合考虑多方面的的因素, 基于考虑的因素不同或研究的侧重点不一样,所建立的模型也就不唯一,往往也不一定能 正确反映风力发电系统的全部特性。本文将风力发电系统分为多个子系统,利用键合图理 论对各子系统进行了键合图建模分析和验证,建立了较为详细的风力发电系统的键合图模 型,但由于自身知识的不足,加之时间限制,所完成的工作都是比较基础的,论文中的很 多内容还可以进行更为深入的研究:

1. 建立风力机叶片结构的键合图模型。文中虽建立了风轮气动模型,正确反映了风力 产生气动转矩和轴向推力的过程,但没有考虑风轮中长、柔叶片的结构,便忽略了叶片对 系统动态性能的重要影响,接下来可对风力机叶片的结构进行键合图描述,利用键合图分 析风力机的气动性能。

本文对传动链进行了详细的建模,尤其是易发生损坏的齿轮箱部分,但只考虑了齿轮间的啮合刚度,且仅是分析了扭转振动特性,并没有考虑齿轮间的啮合阻尼,齿面摩擦对齿轮箱的影响,接下来可以结合未考虑到的因素对传动系统进行进一步的完善,并对齿轮箱进行参数优化。

3. 风力机控制系统的键合图描述。本文初步探讨了变桨调节机构的键合图模型,为风 电系统中的控制部分作出铺垫,后续可对液压变桨距系统结构进行完善,对制动系统、偏 航系统进行研究与分析,同时根据研究的实际情况对模型进行修改及完善,并在此基础上 对风机系统进行动态性能分析。

66

参考文献

[1] 赵群, 王永泉, 李辉. 世界风力发电现状与发展趋势[J]. 机电工程, 2007, 23(12): 16-18.

[2] Fan Z, Seo K, Hu J, et al. A novel evolutionary engineering design approach for mixed-domain systems[J]. Engineering Optimization, 2004, 36(2): 127-147.

[3] Favre W, Scavarda S. Bond graph representation of multibody systems with kinematic loops[J]. Journal of the Franklin Institute, 1998, 335(4): 643-660.

[4] Karnopp D C, Margolis D L, Rosenberg R C. Basic Bond Graph Elements[J]. System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems, Fifth Edition, 2012: 37-76.

[5] Orbak A Y, Turkay O S, Eskinat E, et al. Model reduction in the physical domain[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2003, 217(6): 481-496.

[6] Gawthrop P J, Bevan G P. Bond-graph modeling[J]. Control Systems, IEEE, 2007, 27(2): 24-45.

[7] 王艾伦. 复杂机电系统 (键合图—模态分析) 方法研究[D]. 中南大学, 2004.

[8] Agarwal S, Chalal L, Dauphin-Tanguy G, et al. Bond Graph Model of Wind Turbine Blade[J]. Bond Graph Modeling: Theory and Practice MathMod Vienna, 2012.

[9] Sanchez R, Dauphin-Tanguy G, Guillaud X, et al. Bond graph based control of a three-phase inverter with LC filter–Connection to passive and active loads[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(9): 1185-1198.

[10] Alipour R, Behbahani S, Sedaghat A. Accurate modeling of wind turbine gearbox and bushes with the bond graph method[J]. Majlesi Journal of Mechatronic Systems, 2013.

[11] Bakka T, Karimi H R. Wind turbine modeling using the bond graph[C].Computer-Aided Control System Design, 2011 IEEE International Symposium on. IEEE, 2011: 1208-1213.

[12] Bakka T, Karimi H R. Bond graph modeling and simulation of wind turbine systems[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(6): 1843-1852.

[13] Umesh Rai B, Umanand L. Bond graph model of doubly fed three phase induction motor using the Axis Rotator element for frame transformation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, 16(10): 1704-1712.

[14] Kim J, Bryant M D. Bond graph model of a squirrel cage induction motor with direct physical correspondence[J]. Journal of dynamic systems, measurement, and control, 2000, 122(3): 461-469.

[15] Landen D. Analysis of electromagnetic systems using the extended bond graph method: mechanically static systems[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 2003, 39(1): 491-497.

[16] Ronkowski M. Modelling of electrical machines using the Modelica Bond-Graph Library[C]//Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th. IEEE, 2008: 880-886.

[17] Batlle C, Dòria-Cerezo A. Bond graph models of electromechanical systems. the ac generator case[C]//Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on. IEEE, 2008: 1064-1069.

[18] Umesh Rai B, Umanand L. Bond graph toolbox for handling complex variable[J]. Control Theory & Applications, IET, 2009, 3(5): 551-560.

[19] Umarikar A C, Umanand L. Modelling of switching systems in bond graphs using the concept of switched power junctions[J]. Journal of the Franklin Institute, 2005, 342(2): 131-147.

[20] 高海鸥. 基于键合图理论的混合动力电动汽车建模与仿真[D]. 武汉理工大学, 2004.

[21] 刘云, 王艾伦. 基于键合图的复杂机电系统动力学相似分析[J]. 系统仿真学报, 2009 (20): 6339-6343.

[22] 李庆凯, 唐德威, 姜生元, 等. 封闭式行星轮系功率流判别的键合图法[J]. 北京航空航 天大学学报, 2012, 38(009): 1250-1254.

[23] 孙伟, 董荣梅, 许焕卫. 基于键合图的风电齿轮传动系统稳健优化设计[J]. 中国机械 工程, 2009 (21): 2549-2553.

[24] 唐进元,陈海锋,王祁波.考虑间隙与摩擦时的齿轮传动动力学键合图建模研究[J]. 机械工程学报,2011,47(9):53-59.

[25] 袁敏. 基于键合图理论的 2K-H 行星齿轮传动系统动力学分析[D]. 重庆大学, 2006.

[26] 周卫, 张尧, 夏成军, 等. 基于 Bond Graph 的风力发电机建模[J]. 电力系统保护与控制, 2010 (5): 16-19.

[27] 李腾, 刘延杰, 孙立宁, 等. 考虑端部效应的永磁直线同步电机键合图建模[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(2).

[28] 宋冬然. 基于键合图理论的双级矩阵变换器励磁双馈风力发电系统的建模研究[D]. 中南大学, 2009.

[29] 贝太周. 风力发电机组并网逆变器的故障诊断研究[D]. 新疆大学, 2012.

[30] 尤优. 基于键合图的风电机组液压变桨距系统研究[D]. 华北电力大学 (北京), 2011.

[31] 程嵩. 基于键合图的电力系统次同步振荡分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.

[32] 康珺. 机电液一体化系统的复合建模与控制方法研究[M]. 北京:国防工业出版社,

68

2013.

[33] 王中双. 键合图理论及其在系统动力学中的应用[M]. 哈尔滨工程大学出版社, 2007.

[34] 瞿华. 机械系统仿真原理与应用[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2008.

[35] Gawthrop P J, Bevan G P. Bond-graph modeling[J]. Control Systems, IEEE, 2007, 27(2): 24-45.

[36] Merzouki R, Samantaray A K, Pathak P M, et al. Bond Graph Modeling of Mechatronic Systems[M]//Intelligent Mechatronic Systems. Springer London, 2013: 15-109.

[37] Karnopp D C, Margolis D L, Rosenberg R C. System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems[M]. Wiley, 2012.

[38] Ragheb A, Ragheb M. Wind turbine gearbox technologies[C]//Nuclear & Renewable

Energy Conference (INREC), 2010 1st International. IEEE, 2010: 1-8.

[39] Council G W E. Global wind statistics 2012[J]. GWEC Report, 2013.

[40] Salman S K, Teo A L J. Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator[J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2003, 18(2): 793-802.

[41] Muyeen S M, Ali M H, Takahashi R, et al. Comparative study on transient stability analysis of wind turbine generator system using different drive train models[J]. Renewable Power Generation, IET, 2007, 1(2): 131-141.

[42] Todorov M, Dobrev I, Massouh F. Analysis of torsional oscillation of the drive train in horizontal-axis wind turbine[C]//Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, 2009: 1-7.

[43] Deur J, Ivanović V, Kuang M, et al. Bond Graph Modeling of Automotive Transmissions and Drivelines[C]//MathMod 2012–7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling. 2012.

[44] Yutao L, Di T. Dynamics Modeling of Planetary Gear Set Considering Meshing Stiffness Based on Bond Graph[J]. Procedia Engineering, 2011, 24: 850-855.

[45] 王艾伦, 钟掘. 模态分析的一种新方法——键合图法[J]. 振动工程学报, 2004, 16(4): 463-467.

[46] 陈强, 唐西胜, 裴玮, 等. 风力发电传动系统的建模与数字模拟研究[J]. 太阳能学报, 2010, 31(011): 1503-1509.

[47] Sanchez R, Medina A. Wind turbine model simulation: A bond graph approach[J].

Simulation Modelling Practice and Theory, 2014, 41: 28-45.

[48] Batlle C, Doria-Cerezo A. Energy-based modelling and simulation of the interconnection of a back-to-back converter and a doubly-fed induction machine[C]//American Control Conference,

2006. IEEE, 2006.

[49] LI T, LIU Y, SUN L, et al. Bond graph approach to the modeling of permanent magnet linear synchronous motor with consideration of end-effect[J]. Electric Machines and Control, 2011, 2: 013.

[50] 吴双群, 赵丹平. 风力发电原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.

[51] 贺益康, 胡家兵, 徐烈.并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版 社, 2011.

[52] 张洪宝, 王秀和, 仲慧. 三相异步电动机的 MATLAB 仿真研究[J]. 电机技术, 2009 (4): 14-18.

[53] 阮毅. 电力拖动自动控制系统[M]. 机械工业出版社, 2010.

[54] Silva L I, Magallan G A, de la Barrera P M, et al. Modeling of electric vehicles dynamics with Multi-Bond Graphs[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE. IEEE, 2010: 1-7.

[55] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

[56] 刘桦. 风电机组系统动力学模型及关键零部件优化研究[D]. 重庆大学, 2009.

[57] Burton T, Jenkins N, Sharpe D, et al. Wind energy handbook[M]. John Wiley & Sons, 2011.

[58] Soares O, Gonçalves H, Martins A, et al. Nonlinear control of the doubly-fed induction generator in wind power systems[J]. Renewable energy, 2010, 35(8): 1662-1670.

[59] Moutis P, Loukarakis E, Papathanasiou S, et al. Primary load-frequency control from pitch-controlled wind turbines[C]//PowerTech, 2009 IEEE Bucharest. IEEE, 2009: 1-7.

[60] Thomsen S C. Nonlinear control of a wind turbine[D]. Technical University of Denmark,

DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark, 2006.

[61] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

致 谢

时光如白驹过隙,转眼之间三年的研究生生活即将结束。值此论文付梓之际,谨向在我论文撰写过程中,以及整个研究生学习、生活期间所有关心和帮助我的人致以深深的谢意!

感谢我的导师范衠教授,在我整个论文写作期间给予的悉心指导和热情帮助。导师渊 博的知识,严谨踏实的治学态度,求真务实的工作作风,活跃的学术思想,宽容大度的长 者风范使我受益匪浅;导师平易近人、坦荡的胸襟、谦虚的为人更是我学习的楷模。研二 期间,我重新换了一个新的课题,面对课题上的压力与困难,导师总是给予我充分的理解 和莫大的鼓舞,满腔热诚地鼓励我不断进取,同时给予我中肯的意见。在此谨向导师致以 崇高的敬意和衷心的感谢!

感谢我的原导师刘雄教授,感谢您在课题上对我的指导和建议及生活上的帮助。祝您 在海外工作顺利、身体健康!同样的,感谢能源所陈严老师、牛小东老师、郑黎明老师、 张兴伟老师以及叶枝全教授的热心指导和关心!衷心地祝愿我敬爱的老师们身体健康,工 作顺利,家庭幸福!

在硕士学习阶段和论文写作期间,我得到了实验室已毕业的梁湿、马新稳、程闽、张林伟、方郁峰、关锡恩、曾德灿、沈世、冠军、邓勇等师兄和杨丹、孟圆圆师姐的帮助和 关怀!在此对你们表示衷心的感谢!祝你们工作顺利,事业有成!

感谢班上的各位同学,我们怀揣着对知识的渴求于汕大相识,在汕大的三年里,我们 一起学习,一起生活,相互陪伴,相互扶持,共同进步,从你们身上我学到了很多,我将 永记我们在一起奋斗的这段美好时光。感谢实验室的师弟师妹们,谢谢你们的关心与帮助, 生活,因你们而更加丰富多彩。

感谢我深爱的父母和一直关心我的亲人、朋友们,是你们的全力支持与殷切期望,让 我有勇气面对所有的困境,使我在求学的道路上走到今天,在此,对你们致以最诚挚的敬 意和衷心的祝福!

朱贵杰

二零一四年四月子汕大

攻读硕士学位期间主要的工作成果

范衛,朱贵杰,王晟等.基于改进微分进化算法的微机电系统组件的布局优化方法.中国,发明专利.专利申请号 201410072383.3.

范衛,朱贵杰,谢淑香等.一种基于键合图和遗传编程的工程设计方法.中国,发明专利.专利申请号 201410078663.5.

个人简历

姓 名	朱贵杰	性	别	男
出生年月	1987年7月	籍	贯	湖南•郴州
政治面貌	中共党员	民	族	汉
专 业	机械电子工程	学	历	硕 士
研究方向	风力发电系统的建模与分析			
教育经历	2007.09~2011.07 长江大学・机械学院・过程装备及其控制工程(本科)			
	2011.09~2014.07 汕头大学・工学院・机械电子工程(硕士)			