

论文题目：

# 基于 Matlab 仿真的双馈风力发电 模拟系统研究

作者姓名： 郭辰辰      入学时间： 2013 年 9 月

专业名称： 电气工程      研究方向： 电力系统自动化

指导教师： 戴陶珍      职      称： 副教授

戴陶珍

论文提交日期： 2015 年 4 月

论文答辩日期： 2015 年 6 月

授予学位日期：



# **THE RESEARCH OF DOUBLE-FED WIND POWER GENERATION SIMULATION SYSTEM BASED ON MATLAB SIMULATION**

**A Dissertation submitted in fulfillment of the requirements of the degree of**

**MASTER OF ENGINEERING**

**from**

**Shandong University of Science and Technology**

**by**

**Guo Chenchen**

**Supervisor: Associate Professor Dai Taozen**

**College of Electrical Engineering and Automation**

**April 2015**

# 声 明

本人呈交给山东科技大学的这篇硕士学位论文，除了所列参考文献和世所公认的文献外，全部是本人在导师指导下的研究成果。该论文资料尚没有呈交于其它任何学术机关作鉴定。

硕士生签名：郭辰辰

日 期：2015.6.10

## AFFIRMATION

I declare that this dissertation, submitted in fulfillment of the requirements for the award of Master of engineering in Shandong University of Science and Technology, is wholly my own work unless referenced of acknowledge. The document has not been submitted for qualification at any other academic institute.

Signature: Guo Chenchen

Date: 2015.6.10

## 摘 要

现如今人类需要面对的发展问题有两个：其一，诸如天然、石油、煤气这类常规能源储藏量日益变小，导致能源枯竭；其二，持续恶化的生态环境。正因存在着此类问题，可再生能源的开发与利用对于人类生活现状的全面改善才有了更为关键的意义。

早期的实验室研究对风力发电的发展起到了关键的引导作用。不过受条件束缚，很多实验室的设备不足，对这项技术的研究发展造成很大障碍。由此看来，在实验室条件下设计、检测、试验风力发电模拟系统，对风力发电的发展来说具有举足轻重的意义。

课题介绍了对风力机的模拟系统的基本原理。首先介绍了交流异步电动机的机械特性、风力机特性，并决定采用异步电机对风力机进行模拟的方案，然后介绍了直接转矩控制方式，鉴于传统直接转矩控制转矩会产生较大的脉动，课题决定对传统直接转矩控制方式进行改进，方法是在每个采样周期里向有效空间电压矢量中插入零矢量，并通过对比 Matlab 仿真结果得出结论：此方法适用于风力机的模拟。

接着，本文还研究了风电系统的并网控制。课题首先介绍了传统并网控制方式和控制策略的原理，然后决定采用基于定子电压定向的负载并网控制策略。并通过 Matlab 仿真软件对此种控制方法进行仿真，仿真结果表明，课题使用的控制策略控制效果较好。

最后课题研究了机侧最大功率跟踪控制策略。对于现有的直接控制（DSC）和间接方式速度控制（ISC）方式进行分析，并通过 Matlab 仿真结果对两种控制方式的控制效果进行对比，基于此本课题决定采用双模控制策略，通过设计切换规律，将 DSC 和 ISC 两种控制方法的优点相结合。通过 Matlab 仿真分析，我们可以得到结论，这种双模控制策略可以在很大程度上改善双馈风力发电系机侧最大功率跟踪控制效果。

**关键词：**风力机模拟，机侧控制，负载并网，双模控制，Matlab

## Abstract

Now human need to face two problems of development: First, such as natural, oil, gas reserves of conventional energy sources such increasingly smaller, resulting in depletion of energy; secondly, the continued deterioration of the ecological environment. Because of the existence of such problems, the development and utilization of renewable energy sources for the overall improvement of the status quo of human life have a more critical significance.

Early laboratory studies on the development of wind power has played a key role in guiding. But bound by the conditions, insufficient number of laboratory equipment, research and development of this technology to create great obstacles. Seen in this light, the design under laboratory conditions, testing, testing of wind power simulation system, a decisive significance for wind power made it.

Subject introduces the basic principles of the simulation of wind turbine systems. First introduced the mechanical properties of wind turbine characteristics AC induction motor, and decided to use asynchronous motors for wind machine to simulate the program, and then introduced the direct torque control, in view of the traditional direct torque control will have a greater torque ripple, issue a decision on the traditional direct torque control is improved by inserting a zero vector to the effective space voltage vector in each sampling cycle, and concludes by comparing the Matlab simulation results: This program is suitable for the simulation of wind turbine.

Then, the paper also studied the wind power system and network control. Introduces the principle of traditional topics and network control method and control strategy, and then decided to use a given vector-oriented and network-based load stator voltage control strategy. And through Matlab simulation software such control method simulation results show that the control strategy used to control the subject better.

Finally, the research side of the machine maximum power tracking control strategy. Conducted for existing direct control (DSC) and indirect way speed control (ISC) mode analysis and Matlab simulation results through two control methods for controlling effects were compared, based on this study decided to use this dual-mode control strategy, by design switching law, the advantages of the DSC and ISC two control methods in combination. By Matlab simulation approach to analysis, we can conclude that this dual-mode control strategy can improve the doubly-fed wind power generation system-side maximum power tracking control effect considerably.

**Keywords:** doubly fed induction generator, rotor-side converter's control, wind power system simulation, load and network, Matlab

# 目 录

<b>1 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 课题的研究背景和意义	1
1.2 国内外的研究现状	1
1.3 课题研究的主要内容	3
<b>2 双馈风力发电系统</b>	<b>5</b>
2.1 风力发电机	5
2.2 双馈式感应发电机的等效电路	7
2.3 双馈式感应发电机的数学模型	8
2.4 本章小结	12
<b>3 双馈风力发电模拟系统的基本原理和控制策略</b>	<b>13</b>
3.1 风力机模拟系统	13
3.2 直接转矩控制的基本原理	14
3.3 直接转矩控制方法的改进	16
3.4 仿真分析与研究	20
3.5 本章小结	24
<b>4 双馈风力发电机侧并网控制研究</b>	<b>25</b>
4.1 并网控制	25
4.2 定子电压矢量定向的负载并网控制	26
4.3 基于比例-谐振调节器的控制方式	29
4.4 本章小结	33
<b>5 双馈风力发电模拟系统机侧最大功率追踪控制研究</b>	<b>34</b>
5.1 系统最大功率追踪原理	34
5.2 直接速度控制方式	35
5.3 间接速度控制方式	40
5.4 最大功率追踪控制方式研究	44
5.5 本章小结	49
<b>6 总结与展望</b>	<b>50</b>

致 谢 .....	51
参考文献 .....	52



## Contents

<b>1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 The topic of the research background and significance .....	1
1.2 The domestic and foreign research research status .....	1
1.3 The main content of the research .....	3
<b>2 Doubly fed wind power generation system.....</b>	<b>5</b>
2.1 Wind power generator.....	5
2.2 Equivalent circuit of doubly fed induction generator .....	7
2.3 The mathematical model of the double fed induction generator.....	8
2.4 Summary .....	12
<b>3 The basic principle and control strategy of doubly fed wind power generation simulation system .....</b>	<b>13</b>
3.1 Wind turbine simulation system .....	13
3.2 The basic principle of direct torque control.....	14
3.3 Improved direct torque control method.....	16
3.4 Simulation analysis and research.....	20
3.5 Summary .....	25
<b>4 Doubly-fed wind power side grid control .....</b>	<b>26</b>
4.1 Grid control .....	26
4.2 Stator voltage vector orientation load and network control.....	27
4.3 Based on the ratio - resonant regulator control method .....	30
4.4 Summary .....	34
<b>5 Maximum power point tracking control of doubly-fed wind power generation system machine simulation side.....</b>	<b>35</b>
5.1 Maximum power point tracking system principle .....	35
5.2 Direct speed control .....	36
5.3 Indirect speed control.....	41
5.4 MPPT control study .....	45
5.5 Summary .....	50
<b>Conclusion and prospect.....</b>	<b>51</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>52</b>
<b>Reference .....</b>	<b>53</b>

# 1 绪论

## 1.1 课题的研究背景和意义

工业革命之后，利用天然气、石油、煤等能源，人类取得了长足发展。不过现实越来越表明，这类石化能源不但面临枯竭危险，在使用的同时也造成了无以挽回的环境问题<sup>[1]</sup>。在人类能源利用技术出现大的突破、找到足够代替化石能源的新能源之前，化石能源仍将是世界经济发展的基础性能源。出于对能源供应安全和全球气候变化的担忧，世界各国纷纷开始寻找传统化石能源的替代能源。而风能作为一种绿色清洁的可再生能源已经成为新一轮能源技术创新中能源生产领域的研究热点。

早期的实验室研究对风力发电的发展起到了关键的引导作用。不过受条件束缚，很多实验室的设备不足，没有风力发电机、风力环境等检测试验装备或场所，对这项技术的研究发展造成很大障碍。所以，如何在实验室条件下对风力机进行模拟，是风能利用的基础性工作，意义重大。因为风能利用系统设备本身比较繁杂，设计时如果要提升系统设备的控制效果，最佳办法便是现场检测、试验，这就需要把大量设备运送到发电现场，从而造成了资金的大量投入以及时间的浪费，由此看来，在实验室条件下设计、检测、试验风力发电模拟系统，对风力发电的发展来说具有举足轻重的意义<sup>[2]</sup>。

基于以上分析，课题将在实验室条件下的对风力发电系统进行模拟。

## 1.2 国内外的研究现状

### 1.2.1 国内外风力发电的研究现状

清洁能源是指在生产过程中不排放温室气体、不产生大气污染物的一次能源。近年来，出于对能源安全和气候变化等因素的考虑，清洁能源发电尤其是风力发电发展迅速。由于风力发电具有资源分布广、开发潜力大、环境友好等特点，各国都将风力发电作为促进能源可持续发展的重要选择。风力发电已经成为一些发达国家能源供应体系中不可缺少的组成部分。

人类进步的原始动力来自于对化石能源的使用，不过这些为人类发展做出重大贡献的功臣同样给我们制造着一些麻烦：环境恶化、能源危机等。与资源大国相比，我国化石能源总量较为丰富，产量却比较低，但是我国的风能资源具有很大的开发潜力。以中

国为例，根据英国石油公司（BP）2014 年发布的《Statistical Review of World Energy 2014》中的数据，我国 2014 年一次性能源消耗总量是 2432.2Mtoe，比美国的 2285.7Mtoe 还多，由此取代后者，居为全球能源耗费大国，不过，美国人均一次性能源耗费量是 7.35toe，国人则只有 1.82toe。同时，煤炭是中国一次性能源主力，其消耗量为总消耗量 70.45%，达 1713.5Mtoe，而事实上，对于煤碳利用，我们由于没有科技优势，而且造成了巨大的煤碳资源浪费。资料表明，国内可利用风能是 2.53 亿千瓦（总储量为 32.68 亿千瓦），风能储量极为丰富。国内首座风能发电场于 1986 年 4 月在山东荣城成功投入使用。截止去年，全国风电设备总计已有 1378 亿千瓦时代发电量，其在当年社会总发电量中占比 2.8%。年均增幅达 10%。

1.2.2 风力机模拟的研究现状

风力机模拟控制是电机控制的一种。让风力发电系统具备和它的风力机同步的功率、转矩特征是风力模拟的目标。由此可见，电机功率或转矩控制才是风力机模拟的实质所在<sup>[3]</sup>。当前我们所研究的风力机模拟控制，从原动机本身类型来看，包括基于直流电动机<sup>[4]</sup>风力机模拟以及基于交流电动机<sup>[5]</sup>风力机模拟两大类型。

(1) 基于直流电动机风力模拟系统

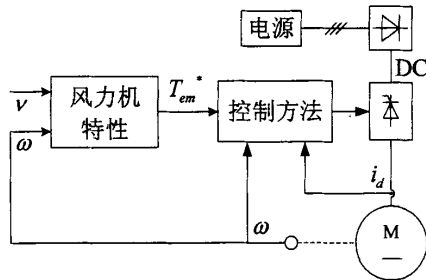


图 1.1 基于直流电机控制的模拟系统  
Fig. 1.1 DC motor control system based on the simulation

上图中的风力模拟的系统是由直流电机控制的，所以称之为基于直流电机控制的风力模拟系统。由于直流电机的电枢绕组电流与其输出电磁转矩之间成正比，因此可以通过控制电枢电流来实现对控制电机输出转矩的控制，从而达到风力机模拟的目的。鉴于直流电动机具有简单的数学模型、优越的控制性能、良好的动静态特性，所以在风力模拟领域被广泛使用<sup>[6]</sup>。与容量、功率一样的交流电机相比，直流电机的价格高、体积大、工艺复杂，增大了系统的整体成本，这是直流电机控制系统的不足之处。

(2) 基于交流发电机的风力模拟系统

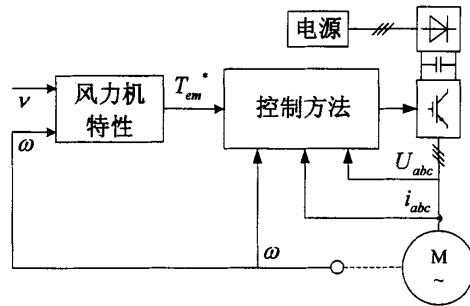


图 1.2 基于交流电机的模拟系统  
Fig. 1.2 AC motor-based simulation system

上图中的风力模拟系统是由交流电机控制的，所以称之为基于交流电机控制的风力模拟系统。此系统与风力涡轮机具有相同的机械性能输出。

日益成熟的交流调控技术使系统对异步电机的控制更加容易，目前已达到控制直流电机的水平，因此在大功率的风力发电模拟系统方面，模拟风力机的工作多由交流电机担负<sup>[7]</sup>。当前，直接转矩控制、矢量控制是模拟风力机的交流电机控制的两种主要方式。文献<sup>[8]</sup>模拟异步电机风力机的完成则运用了直接转矩控制法，直接转矩控制法与矢量控制法相比，前者更简便，不过，其低速运行时，电流畸变、转矩脉动大。文献<sup>[9]</sup>模拟风力机时所运用的是直接转矩控制，模拟效果获得明显改善，不过系统开关频率的提升增加了对开关元件的质量需求。

1.3 课题研究的主要内容

通过以上对课题的研究背景和意义以及现阶段研究现状的分析可知，本课题的主要研究内容如下：

第一章，作为绪论部分。首先介绍了本课题的研究背景及意义；然后介绍了风力模拟系统的研究现状。

第二章，是对本次研究的理论阐述。首先介绍了风力发电机的基本运行原理，然后引出双馈式风力发电机的理论基础，并通过双馈式风力发电机的结构图详细分析了双馈式感应发电机的运行原理；最后由坐标变换、建模，得到双馈式感应发电机的数学模型。

第三章，是对双馈风力发电模拟系统的基本原理和控制策略进行的研究。首先介绍风力模拟的具体概念，并指出本课题将对基于异步电机控制系统进行研究。然后介绍传统直接转矩控制和间接转矩控制的基本原理；继而具体说明传统直接转矩控制的不足之处，即会产生转矩脉动，然后提出对传统直接转矩控制方法进行改进，并详细阐述改进

后的理论基础，最后使用 Matlab 仿真软件比较看出改进的直接转矩控制策略的优点。

第四章，首先介绍了负载并网方式。用 Matlab 仿真软件对空载并网方式和空载并网方式进行仿真，通过对仿真结果的分析，课题决定选用负载并网方式。紧接着，课题对应用了自适应比例-谐振调节器的基于可以提高电能的输出质量，减少发电系统对电网的冲击。

第五章，总结 ISC（间接速度控制）、DSC（直接速度控制）特性；随后，依据两种方式的长处与不足，运用双模控制理论，利用切换规则设计，最终把切换最大功率追踪控制的二种方式完成，增强了控制系统的运行效果；对比分析了 ISC、DSC 与完善后的双模控制的仿真效果，结果显示，改进的双模控制方式能使传统最大功率追踪控制的控制效果得到有效改善。

## 2 双馈风力发电系统

### 2.1 风力发电机

风力发电机的工作原理是：风能被叶轮吸收，转化为机械能，随后，机械能经过齿轮箱驱动器，向发电系统转输，但流经涡轮的空气流会持续保持流动，换言之，风能无法被风力机全部吸收，所以我们用风力机的机械功率  $P_m$  与风轮扫掠面获得的功率比值来对风能利用效率进行描述，如果把风能利用系数定义为  $C_p$ ，则有：

$$C_p = \frac{P_m}{P_v} \quad (2.1)$$

式中  $P_m$ ——系统吸收的机械功率；

$P_v$ ——通过风轮的全部功率。

由贝兹理论可知，可得风力机风实际输送给发电系统的的机械功率为<sup>[10]</sup>：

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (2.2)$$

式中  $\rho$ ——空气密度；

$R$ ——风力机风轮半径；

$\beta$ ——桨叶节距角；

$v$ ——风速；

$\lambda$ ——叶尖速比。

其中叶尖速比  $\lambda$  如下：

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = \frac{\pi R n}{30 v} \quad (2.3)$$

式中  $\omega$ ——风力机的机械角速度 (rad/s)；

$n$ ——风力机的机械转速 (r/min)。

风力机的风能利用率用  $C_p$  与叶片的节距角、风速、风机转速有关。如果桨距角  $\beta$  不

变,  $C_p$  便仅和  $\lambda$  (叶尖速比) 相关, 同时, 一定有一个叶尖速比, 使得  $C_p$  的值最大, 所以, 我们把此时的  $\lambda$  称作最佳叶尖速比  $\lambda_{opt}$ 。

$$\lambda = \frac{\omega_{\omega} R}{v} \quad (2.4)$$

其中  $\omega_{\omega}$  —— 风轮机的角速度 (rad/s);

当风力机的桨距是固定值时, 为了能使系统在额定功率处稳定运行, 需要对系统的转速进行适当的调节, 以达到稳定运行的目的; 当风力机的桨距不是固定的桨距时, 系统既可以调节转速, 也可以在桨距变化时控制, 使系统的输出功率与额定功率的偏差更小。此次研究仅针对桨距为固定值的风力发电系统。

由关系式  $T_m = P / \omega$ , 可以推导出风力机输出机械转矩为:

$$T_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_p(\lambda, \beta) v^2 / \lambda \quad (2.5)$$

由叶尖速比的公式可以看出: 不一样的风速分别对应着不一样的机械转速, 但  $\lambda = \lambda_{opt}$ 。又通过分析贝兹理论和风力机输出的机械转矩我们知道当风速不一样时, 即当  $v_1 < v_2 < v_3 < v_4$  时, 得到风力机输出功率与输出转矩特性如下图所示。其中  $P_{opt}$  曲线为最大功率曲线,  $T_{opt}$  曲线为相应的转矩曲线。

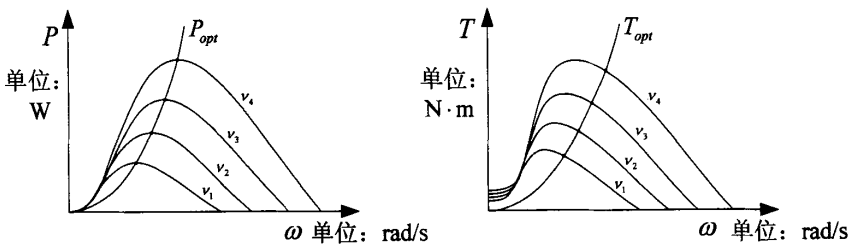


图 2.1 风力机输出功率、输出转矩关系

Fig. 2.1 Wind turbine output power, output torque relationship

## 2.2 双馈式感应发电机的等效电路

### 2.2.1 双馈式感应发电机的等效电路图

建立双馈感应式发电机电路模型。其中双馈发电机转子利用电动机惯例、定子运用发电机惯例、理论依据是发电机定转子侧工作原理。图 2.2 即为等效电路简图。

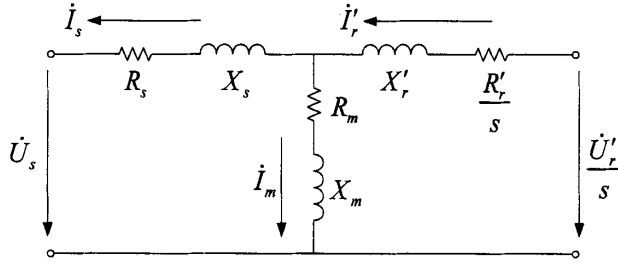


图 2.2 双馈式感应发电机的等效电路

Fig. 2.2 Pairs of equivalent circuit fed induction generator

图 2.2 中转子侧物理量是折算至定子侧以后的折算值，折算方法是将转子侧折算至定子侧，再通过 KVL 与 KCL 公式，可得以下关系式成立<sup>[11]</sup>：

$$\begin{cases} \dot{U}_s = \dot{E}_s - \dot{I}_s(R_s + jX_s) \\ \dot{I}_r' = \dot{I}_s + \dot{I}_m \\ \frac{\dot{U}_r'}{s} = \dot{I}_r'(\frac{R_r'}{s} + jX_r') + \dot{E}_r' \\ \dot{E}_s = \dot{E}_r' \\ \dot{E}_m = j\dot{I}_m X_m \end{cases} \quad (2.6)$$

式中  $\dot{I}_s$ 、 $\dot{I}_r'$ 、 $\dot{I}_m$ ——定、转子电流、励磁电流；

$\dot{E}_s$ 、 $\dot{E}_r'$ ——定子与转子的感应电动势；

$R_s$ 、 $X_s$ ——定子侧电阻、电抗；

$R_r'$ 、 $X_r'$ ——折算后的电阻、电抗；

$R_m$ 、 $X_m$ ——励磁回路电阻、电抗。

### 2.2.2 双馈发电机的运行原理

风力机将通过风轮吸收的风能转化为机械能，而后再将转化来的机械能传递给风力机的转子，转子得到机械能后即开始旋转，而此时发电机的励磁变换器的会对发电机的



转子进行励磁，这将导致转子会产生磁场，又因为感应磁场不是静止的，而发电机的定子相对静止，所以定子将产生旋转磁场。将  $P_{mec}$  设定为电机的输入功率， $P_{mec} - P_{\Omega} = P_{em}$ ，其中  $P_{em}$  即为气隙的电磁功率；而转差率  $s$  决定了  $P_{em}$  在定子内的分布：定子的电磁功率为  $P_{em1} = P_{em} / (1-s)$ ；转子的电磁功率为  $P_{em2} = P_{em} (s/(1-s))$ 。定子与转子侧减去各自回路中的铜损，就得到定子侧的输、转子侧各自的输出功率  $P_1$ 、 $P_2$ 。依据发电机惯例，当  $P_1 > 0$  时，说明发电机定子端输出功率， $P_1 < 0$  时说明发电机定子端吸收功率；当  $P_2 > 0$  时，说明发电机转子端吸收功率， $P_2 < 0$  时表示发电机转子端输出功率。如果  $0 < s < 1$ ，发电机此时在亚同步状态中运行，转子接收到的气隙传递来的电磁功率是  $P_{em2} = sP_{em1}$ ，也就是说定子接收的电磁功率是  $(1-s)P_{em1}$ ；如果  $s < 0$ ，也就是说，转子侧将能量回馈给电网，此时的发电机在超同步状态运行，它的功率是  $|s|P_{em1}$ ，因为此类功率同样来自于原动机，所以整个发电系统所接收原动机所输送来的电磁功率增加到  $(1+|s|)P_{em1}$  [12]。

## 2.3 双馈式感应发电机的数学模型

### 2.3.1 三相静止坐标系下的数学模型

与上一节中采用相同的建模规则，由发电机输出转矩关系式，建立双馈式感应发电机的数学模型 [13]。

#### 1. 电压方程

定子侧的三相电压关系式：

$$\begin{cases} U_{sa} = -R_s i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt} \\ U_{sb} = -R_s i_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt} \\ U_{sc} = -R_s i_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (2.7)$$

式中  $U_{sa}$ 、 $U_{sb}$ 、 $U_{sc}$  —— 定子侧的相电压；

$i_{sa}$ 、 $i_{sb}$ 、 $i_{sc}$  —— 定子侧的相电流；

$\psi_{sa}$ 、 $\psi_{sb}$ 、 $\psi_{sc}$  —— 定子绕组的磁势；

$R_s$  —— 定子绕组的电阻。

转子侧的三相电压关系式:

$$\begin{cases} U_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt} \\ U_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\psi_{rb}}{dt} \\ U_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (2.8)$$

式中  $U_{ra}$ 、 $U_{rb}$ 、 $U_{rc}$ ——转子侧的相电压;

$i_{ra}$ 、 $i_{rb}$ 、 $i_{rc}$ ——转子侧的相电流;

$\psi_{ra}$ 、 $\psi_{rb}$ 、 $\psi_{rc}$ ——转子绕组的磁势;

$R_r$ ——转子绕组的电阻。

## 2. 磁链方程

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

其中有  $\psi_s = [\psi_{sa} \quad \psi_{sb} \quad \psi_{sc}]^T$ ,  $\psi_r = [\psi_{ra} \quad \psi_{rb} \quad \psi_{rc}]^T$ ,  $i_s = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T$ ,

$i_r = [i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}]^T$ ,

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{sl} + L_{ms} & -0.5L_{ms} & -0.5L_{ms} \\ -0.5L_{ms} & L_{sl} + L_{ms} & -0.5L_{ms} \\ -0.5L_{ms} & -0.5L_{ms} & L_{sl} + L_{ms} \end{bmatrix}, \quad L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{rl} + L_{mr} & -0.5L_{mr} & -0.5L_{mr} \\ -0.5L_{mr} & L_{rl} + L_{mr} & -0.5L_{mr} \\ -0.5L_{mr} & -0.5L_{mr} & L_{rl} + L_{mr} \end{bmatrix},$$

$$L_{sr} = L_{rs}^T = L_{ms} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta+120^\circ) & \cos(\theta-120^\circ) \\ \cos(\theta-120^\circ) & \cos\theta & \cos(\theta+120^\circ) \\ \cos(\theta+120^\circ) & \cos(\theta-120^\circ) & \cos\theta \end{bmatrix}$$

式中  $L_{sl}$ 、 $L_{rl}$ ——定子侧、转子侧漏感;

$L_{ms}$ ——定子互感;

$L_{mr}$ ——的转子互感, 且有  $L_{ms} = L_{mr}$ ;

$\theta$ ——电机转子的电角度。

## 3. 转矩方程

$$\begin{aligned} T_{em} = & -pL_{ms}[(i_{sa}i_{ra} + i_{sb}i_{rb} + i_{sc}i_{rc})\sin\theta + (i_{sa}i_{rb} + i_{sb}i_{rc} + i_{sc}i_{ra})\sin(\theta+120^\circ) \\ & + (i_{sa}i_{rc} + i_{sb}i_{ra} + i_{sc}i_{rb})\sin(\theta-120^\circ)] \end{aligned} \quad (2.10)$$

式中  $T_{em}$  ——电磁转矩；

$p$  ——电机极对数。

### 2.3.2 两相旋转坐标系下的数学模型

分析可知，想要完成一组于直流量（旋转坐标系中）和一组于交流量（静止坐标系中）之间的变换，只要完成直流静止模型（ $d, q$  旋转坐标系内）与交流矢量旋转模型（ $ABC$  静止坐标系内）两者之间的转换就能实现。这样就能显著简化控制发电机的控制，而且将会有较好的控制效果<sup>[13]</sup>。其坐标变换过程如图 2.3 所示。

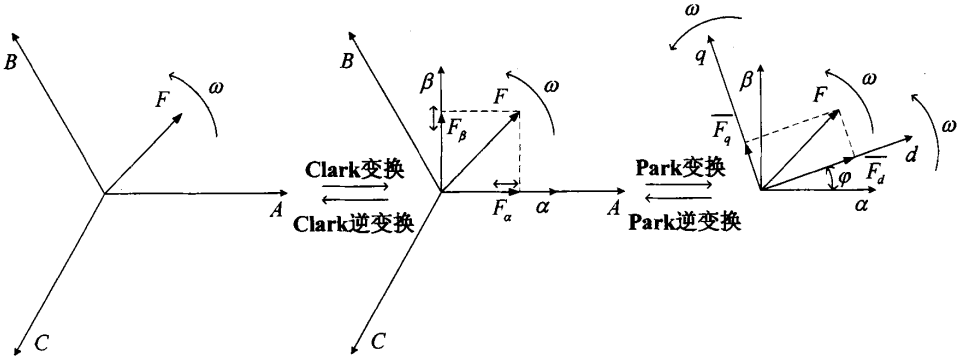


图 2.3 变换与逆变换

Fig. 2.3 Transform and inverse transform

(1) Clark 变换是由三相静止  $ABC$  坐标系到两相静止  $\alpha\beta$  坐标系得到的变换，通常来讲当  $\alpha$  轴与  $A$  轴重合时，其变换矩阵  $C_{3s/2s}$  和逆变换矩阵  $C_{2s/3s}$  如下式所示：

$$C_{3s/2s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$C_{2s/3s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

(2) Park 变换是由两相静止  $\alpha\beta$  坐标系到两相旋转  $dq$  坐标系变换得到的，此时需要定向  $d$  轴的位置，其变换矩阵  $C_{2s/2r}$  和逆变换矩阵  $C_{2r/2s}$  如下式所示：

$$C_{2s/2r} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$C_{2r/2s} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

式中  $\varphi$  ——  $\alpha$  轴与定向的  $d$  轴之间的夹角。

通过以上两种变换方式，得到两相旋转坐标系下的数学模型：

### 1. 电压方程

$$\begin{cases} U_{ds} = -R_s i_{ds} + D\psi_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} \\ U_{qs} = -R_s i_{qs} + D\psi_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} \\ U_{dr} = R_r i_{dr} + D\psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} \\ U_{qr} = R_r i_{qr} + D\psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} \end{cases} \quad (2.15)$$

式中  $U_{ds}$ 、 $U_{qs}$ 、 $U_{dr}$ 、 $U_{qr}$  —— 定、转子电压  $d$ 、 $q$  分量；

$i_{ds}$ 、 $i_{qs}$ 、 $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$  —— 定、转子电流  $d$ 、 $q$  分量；

$\psi_{ds}$ 、 $\psi_{qs}$ 、 $\psi_{dr}$ 、 $\psi_{qr}$  —— 定、转子磁势  $d$ 、 $q$  分量；

$D$  —— 微分算子；

$\omega_1$  —— 工频电角速度；

$\omega_s$  —— 转差角速度， $\omega_s = \omega_1 - p\omega$ 。

### 2. 磁链方程

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = -L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = -L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (2.16)$$

式中  $L_m$  —— 坐标转化后的互感， $L_m = 1.5L_{ms}$ ；

$L_s$  —— 坐标转换后的定子自感， $L_s = L_{sl} + L_m$ ；

$L_r$  —— 坐标转换后的转子自感， $L_r = L_{rl} + L_m$ 。

### 3. 转矩方程

$$T_{em} = p(\psi_{qs} i_{ds} - \psi_{ds} i_{qs}) = pL_m(i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr}) \quad (2.17)$$

### 4. 运动方程同式 (2.10)。

通过对数学模型的分析，我们得到双馈式感应风力发电机定子瞬时有功功率、无功

功率表达式为：

$$\begin{cases} P_s = U_{ds}i_{ds} + U_{qs}i_{qs} \\ Q_s = U_{qs}i_{ds} - U_{ds}i_{qs} \end{cases} \quad (2.18)$$

式中  $P_s$ ——定子有功功率；

$Q_s$ ——定子无功功率。

## 2.4 本章小结

本章是对双馈风力发电系统运行的原理进行分析。首先通过风力机的运行原理，并介绍了风能利用系数和最佳叶尖速的定义；然后通过双馈式风力系统的等效电路图进一步介绍了风力发电系统的运行原理；然后作出双馈式感应发电机的数学模型，并详细介绍了三相静止坐标到两相旋转坐标下的转换，列出转换后的各关系式，为下面几章的研究做好相应的理论铺垫。

### 3 双馈风力发电模拟系统的基本原理和控制策略

#### 3.1 风力机模拟系统

风力机模拟的是在实验室条件下对实际风力机的输出功率与转速关系的一种模拟。要实现这种模拟，应该以风力机的运行原理为理论基础，采用特定的电动机和控制策略。风力模拟系统中的电机并不能直接得到功率，所以电机的准确度会受到很多方面的影响。鉴于此方面原因我们可以对转矩进行控制，从而对风力机系统进行模拟。

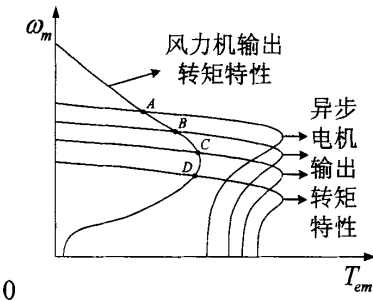


图 3.1 异步电机的风力机模拟

Fig. 3.1 Wind turbine simulation induction motor

图 3.1 是基于异步电机的风力模拟系统转矩特性与风力机输出转矩特性图，如果异步电机可以运行在其与风力机输出转矩特性线的交点上，那么就能实现基于异步电机的风力机的模拟。即如图 3.1，系统通过计算得到风力模拟所需的输出转矩大小，然后通过对异步电机的控制，使其在交点处即图中的 A 点、B 点、C 点、D 点处运行，就可以进行风力机模拟。

在对风力发电系统进行模拟时，通常使用的控制方法是矢量控制。但这种控制方法的主要思想是把交流量在坐标系中进行转换，转换成相应的直流量后再进行分析控制。可见，传统的矢量控制法较为繁琐。而直接转矩控制的控制方法相对简单，无需进行坐标变换，换言之，这种控制方式可以直接控制电机的电磁转矩，可以实现转矩的快速响应，所以，其更适用于风力机模拟。通过归纳，直接转矩控制方式有以下三个特点<sup>[14]</sup>：

(1)直接转矩控制系统能在定子坐标系中直接分析交流电机数学模型进而控制电机定子磁链、电磁转矩。对于用户来说也能更方便的观察交流电机现阶段的工作状态，也

就是说，用户可以更直接得做出明确判断，并对系统进行调试。

(2) 直接转矩控制可以很好的缓解矢量控制时当参数变化时，控制效果容易受到影响的现象。这是因为直接转矩控制系统仅需了解定子电阻的阻值，通过定子磁场对磁场定向，就能通过反电势的积分法得到定子磁链。

(3) 这种方式只要求电机输出电磁转矩的控制效果好、反应速度快，对定子磁链矢量转移轨迹状态没有要求，不一定是圆，定子电流波形同样也没有要求非是正弦不可，电机内部磁场运动是否为恒速状态也无关紧要。

综上，本课题采用直接转矩控制的方式来对双馈风力发电模拟系统的进行模拟。

### 3.2 直接转矩控制的基本原理

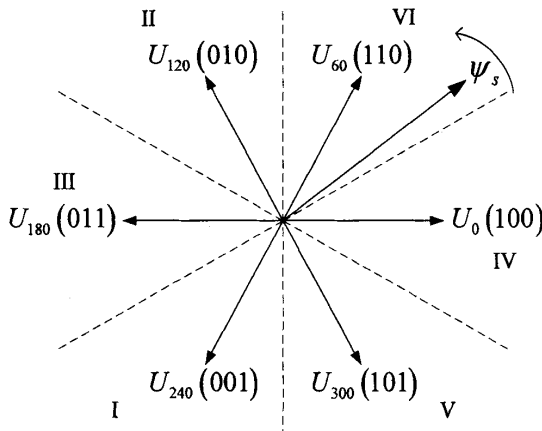


图 3.2 直接转矩控制的空间电压矢量的分布

Fig. 3.2 Distribution of direct torque control of space voltage vector

上图是直接转矩控制中的空间电压矢量的分布。

整个空间被划分为如图 3.2 所示的六个区域。划分界限为：两两毗邻的有效空间电压矢量夹角中线。假定磁链为逆时针旋转，当定子磁链位于第 VI 区域时，如果想要使磁链的旋转速度变大，则需要加载  $U_{120}(010)$  或者  $U_{180}(011)$ ，这两个有效空间电压矢量是正向的，而且其方向与磁链旋转方向相同， $U_{120}(010)$  能增大磁链的幅值， $U_{180}(011)$  能减小磁链的幅值；如果想要电磁转矩变小，也就是需要使定子磁链的旋转速度变小，则需要加载与磁链旋转方向相反的反向有效空间电压矢量  $U_0(100)$  或  $U_{300}(101)$ ， $U_0(100)$  可以使磁链的幅值变大， $U_{300}(101)$  可以使磁链的幅值变小。由此，使用相同的方法，能依次分析其它五个扇区内的定子磁链情况。

直接转矩系统将在运行过程中首先要计算出转矩误差。此误差是由给定的电磁转矩减去工作时的电磁转矩得到的，然后信号到达滞环调节器的比较环节，通过比较后滞环调节器给出转矩开关信号，继而确定定子磁链此时所处的扇形区域，接下来由直接转矩控制的开关状态选择表查出合适的定子空间电压矢量，空间电压矢量确定后，逆变器的开关状态随之确定，这样异步电机的电磁转矩就能迅速跟踪外部给定的电磁转矩。直接转矩控制的系统结构图如图 3.3 所示。

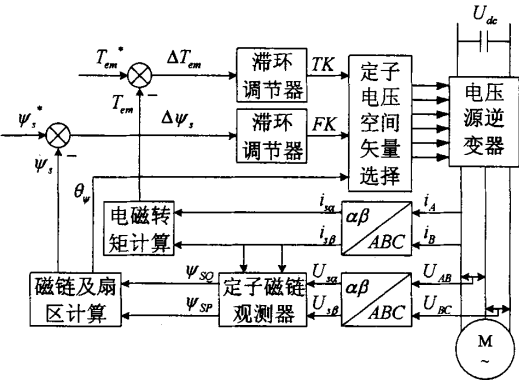


图 3.3 直接转矩控制系统结构图

Fig. 3.3 Direct torque control system block diagram

下面介绍如何通过直接转矩控制的开关状态选择表来确定定子空间电压矢量。

第一步判定定子磁链所处扇区。随后综合考虑磁链变化，同时要考虑转矩方面的变化，选择适合的空间电压矢量。TK 是转矩滞环调节器输出，其值为+1 时，说明要增加转矩，其值为 0 时，说明转矩不变，其值为-1 时，说明要减小转矩；FK 是磁链滞环调节器输出，其值为+1 时，说明要增加磁链，其值为 0 时，说明要减少磁链。由此为判断标准，我们得到直接转矩控制开关的状态表如表 3.1 所示。

表 3.1 直接转矩控制的开关状态选择表

Table 3.1 Direct torque control selection table

扇区号		IV	VI	II	III	I	V
FK	TK						
+1	+1	$U_{60}(110)$	$U_{120}(010)$	$U_{180}(011)$	$U_{240}(001)$	$U_{300}(101)$	$U_0(100)$
	0	z	z	z	z	z	z
	-1	$U_{300}(101)$	$U_0(100)$	$U_{60}(110)$	$U_{120}(010)$	$U_{180}(011)$	$U_{240}(001)$
0	+1	$U_{120}(010)$	$U_{180}(011)$	$U_{240}(001)$	$U_{300}(101)$	$U_0(100)$	$U_{60}(110)$
	0	z	z	z	z	z	z
	-1	$U_{240}(001)$	$U_{300}(101)$	$U_0(100)$	$U_{60}(110)$	$U_{120}(010)$	$U_{180}(011)$

表中 z——零空间电压矢量



### 3.3 直接转矩控制方法的改进

直接转矩控制是现阶段交流调速研究的热点，其优点是完成电磁转矩与定子磁链解耦控制无需经由电流内环解耦控制及磁场定向算法，但其最明显的不足之处在于电流脉动大、转矩大。鉴于控制效果方面的电动机转矩大、电流产生脉动这样的不足处理所需，一些学者认为，可以在直接转矩控制系统内引入无差拍控制技术<sup>[15]</sup>。

为了实现无差拍控制，首先将当前采样到的转矩偏差值电动机定子侧电压方程中，同时得到下个采样周期，这样就可以把磁链、转矩误差的空间合成电压矢量降低。从理论分析来看，磁链与转矩误差运用此类控制方式后，可以减小到零，同时转矩脉动消失，有效避免了直接转矩控制的缺陷。为了获得更好的电磁转矩、定子磁链无差拍控制综合效果，展开繁杂计算是必然的，但问题是，这将导致让现实控制过程中的无差拍控制极难完成。资料显示，利用空间电压矢量调制方式，能显著改变控制效果。

本节分析了传统直接控制方式的不足之处，即会产生转矩脉动，并在此基础上对传统直接转矩控制进行改进，以克服其不足之处。

#### 3.3.1 转矩脉动产生的原因

电机磁链的状态方程：

$$\begin{bmatrix} \frac{d\psi_s}{dt} \\ \frac{d\psi_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma\tau_s} & \frac{L_m}{\sigma\tau_s L_r} \\ \frac{L_m}{\sigma\tau_r L_s} & j\omega - \frac{1}{\sigma\tau_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_s \quad (3.1)$$

式中  $\tau_r$ ——转子参数， $\tau_r = L_r/R_r$ ；

$\tau_s$ ——定子参数， $\tau_s = L_s/R_s$ 。

将上式进行离散化，可得如下关系式成立：

$$\begin{cases} \psi_{s(k+1)} = \left(1 - \frac{1}{\sigma\tau_s} \Delta t\right) \psi_{sk} + \frac{L_m \Delta t}{\sigma\tau_s L_r} \psi_{rk} + u_{sk} \Delta t \\ \psi_{r(k+1)} = \left(1 + j\omega \Delta t - \frac{1}{\sigma\tau_r} \Delta t\right) \psi_{rk} + \frac{L_m \Delta t}{\sigma\tau_r L_s} \psi_{sk} \end{cases} \quad (3.2)$$

由式 (3.2)，可知  $k+1$  时刻的电磁转矩为：

$$T_{em(k+1)} = \frac{pL_m}{\sigma L_s L_r} (\psi_{s(k+1)} \times \psi_{r(k+1)}) \quad (3.3)$$

将离散化后得到的  $\psi_{s(k+1)}$  与  $\psi_{r(k+1)}$  代入电磁转矩式, 得到以下关系式:

$$T_{em(k+1)} = T_{emk} - T_{emk} \left( \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_r} \right) \frac{\Delta t}{\sigma} + \frac{pL_m}{\sigma L_s L_r} [u_s \times \psi_{rk} - (j\omega \psi_{sk}) \times \psi_{rk}] \Delta t \quad (3.4)$$

通过分析  $T_{gm(k+1)}$  的表达式, 我们知道式中的  $T_{gmk} \left( \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_r} \right)$  和  $[u_s \times \psi_{rk} - (j\omega \psi_{sk}) \times \psi_{rk}]$  这两部分会对电磁转矩产生影响。其中  $T_{gmk} \left( \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_r} \right)$  与前一时刻的电磁转矩和采样时间有关, 可见此项并不是直接转矩控制所产生的转矩脉动的主因; 而  $[u_s \times \psi_{rk} - (j\omega \psi_{sk}) \times \psi_{rk}]$  与定转子磁链、电压空间矢量以及机械角速度有关系, 所以此项是转矩脉动产生的关键原因所在。

除此之外, 滞环比较过程也会产生转矩脉冲。下图是滞环比较转矩脉动产生示意图, 从图中我们可以看出从  $A$  到  $B$  再从  $C$  到  $D$ , 如果图中所示的此种现象在每次靠近滞环的边缘附近都出现, 那么输出的转矩就会出现脉动, 异步电机的风力机的模拟效果也将会直接受到此类脉动的干扰, 这就要求我们尽量避免这种带有脉动的转矩的输出。

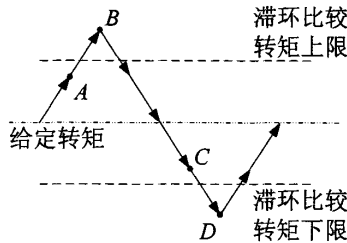


图 3.4 滞环比较转矩脉动产生示意图

Fig. 3.4 Hysteresis torque ripple generated schematic

### 3.3.2 改进的直接转矩控制方法

当系统达到稳定运行时, 即异步电机的输出转矩在给定转矩附近波动时, 机械角速度  $\omega$  为定值, 此时输出转矩近似等于系统给定转矩, 根据异步电机电磁转矩公式, 可得下式成立:

$$T_{em} = \frac{pL_m}{\sigma L_s L_r} (\psi_s \times \psi_r) \approx T_{ref} \quad (3.5)$$

经整理, 可得:

$$\psi_s \times \psi_r = \frac{\sigma L_s L_r T_{ref}}{pL_m} \quad (3.6)$$

在上述表达式中，等式的右侧为常数，所以  $\psi_s \times \psi_r$  不变。此时机械角速度  $\omega$  恒定，则有  $(j\omega\psi_s) \times \psi_r$  恒定。由式 (3.4)，可得：

$$T_{em(k+1)} = T_{emk} - T_{emk} \left( \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_r} \right) \frac{\Delta t}{\sigma} - \frac{pL_m}{\sigma L_s L_r} [(j\omega\psi_{sk}) \times \psi_{rk}] \Delta t + \frac{pL_m}{\sigma L_s L_r} (u_s \times \psi_{rk}) \Delta t \quad (3.7)$$

对式 (3.7) 进行整理，可得：

$$T_{em} = C + \frac{pL_m}{\sigma L_s L_r} (u_s \times \psi_{rk}) \Delta t \quad (3.8)$$

式中  $C$ ——常数。

由上式可知，此时只有  $\frac{pL_m}{\sigma L_s L_r} (u_s \times \psi_{rk}) \Delta t$  会影响电磁转矩的脉动。通过分析  $T_{gm}$  的表达式我们可以看出：如果能使电压空间矢量  $u_s$  的减小，那么  $\frac{pL_m}{\sigma L_s L_r} (u_s \times \psi_{rk}) \Delta t$  也就相应的减小，这样就使电磁转矩的脉动也减小了。

综上所述，本课题运用的是于采样周期内，把零开关矢量插入有效电压空间矢量中的方法把电压空间矢量降低，进而把电机转矩脉动降低。此方法示意图如图 3.5，就是在某一个采样周期中，向有效的电压空间矢量“110”的电压空间矢量插入零矢量“000”。

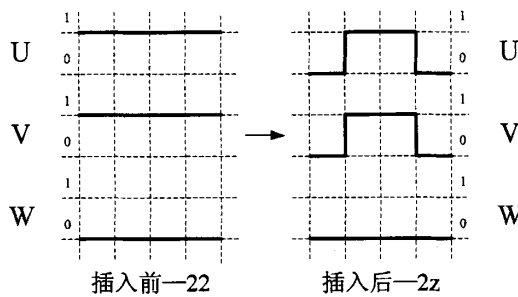


图 3.5 向电压空间矢量中插入零矢量

Fig. 3.5 Insert a zero voltage space vector to vector

尽管运用零矢量插入空间电压矢量的方法能够使电磁转矩脉动降低，可是这种方法也存在不足之处。不足之处在于，这种方法要求系统由一个状态转化到另一个状态的进程更久，如果系统给定的转矩发生突变，那么系统可能无法稳定运行。针对以上所述的

出现电磁转矩脉动的现象，本次研究采用了一种转矩控制双层滞环比较的方法同时还采用查表的方式来对直接控制转矩控制方法进行改善，通过查表可以将适合的零矢量插入给定的电压空间矢量。下图为本课题中设计的转矩控制双层滞环比较示意图。

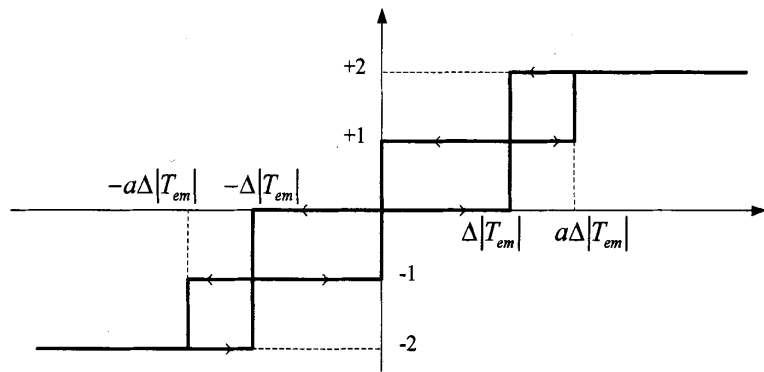


图 3.6 转矩控制双层滞环比较  
Fig. 3.6 Torque control double hysteresis

改进后的开关选择表如表 3.2 所示。改进后的开关选择表具体使用方法如下：如果系统有明显的转矩偏差，控制系统为了维持其动态响应过程中的迅速性，拒绝将零矢量插入有效的电压空间矢量中；如果系统的转矩偏差不大，控制系统为了保持输出的转矩脉动稳定减小，将会选择合适的零矢量插入到有效电压矢量中。

表 3.2 改进后的开关选择表  
Table 3.2 Improved switch selection table

FK	TK	磁链所在扇区					
		IV	VI	II	III	I	V
+1	+2	22	33	44	55	66	11
	+1	2z	3z	4z	5z	6z	1z
	0	zz	zz	zz	zz	zz	zz
	-1	6z	1z	2z	3z	4z	5z
	-2	66	11	22	33	44	55
0	+2	33	44	55	66	11	22
	+1	3z	4z	5z	6z	1z	2z
	0	zz	zz	zz	zz	zz	zz
	-1	5z	6z	1z	2z	3z	4z
	-2	55	66	11	22	33	44

表中     FK —— 磁链滞环比较的输出；  
          TK —— 转矩滞环比较的输出；

- “1” —— 电压空间矢量  $U_0(100)$ ;
- “2” —— 电压空间矢量  $U_{60}(110)$ ;
- “3” —— 电压空间矢量  $U_{120}(010)$ ;
- “4” —— 电压空间矢量  $U_{180}(011)$ ;
- “5” —— 电压空间矢量  $U_{240}(001)$ ;
- “6” —— 电压空间矢量  $U_{300}(101)$ ;
- “z” —— 零电压空间矢量。

### 3.4 仿真分析与研究

#### 3.4.1 改进直接转矩控制的仿真

用 Matlab 仿真软件搭建异步电动机直接转矩控制的仿真平台，如图 3.7 所示，仿真所用的电机参数为： $P_N=4000\text{W}$ ； $U_N=380\text{V}$ ； $f_N=60.5\text{Hz}$ ； $R_s=3.65\Omega$ ； $L_s=0.006\text{H}$ ； $R_r=4.35\Omega$ ； $L_r=0.0076\text{H}$ ； $L_m=0.2\text{H}$ ； $p=2$ ； $J=0.014\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

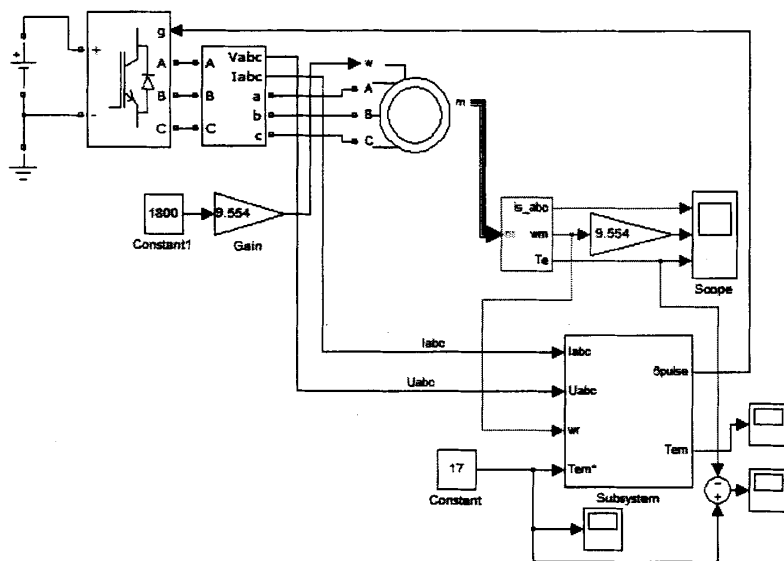


图 3.7 异步电动机直接转矩控制仿真平台

Fig. 3.7 Induction motor direct torque control simulation platform

下面对传统直接转矩控制方法和本文中提到的改进的直接转矩控制方法对电机的电磁转矩、转矩偏差、三相定子电流进行 Matlab 仿真，得到的仿真结果如下列各图所示。仿真时给定如下参数：电机的额定转速 1800rpm，电机的转矩为  $17\text{N}\cdot\text{m}$ 。下面分别对

各仿真结果进行对比并做简要分析。

(1) 电磁转矩的仿真结果如图 3.8 所示（图中横坐标表示时间，单位  $s$ ）。

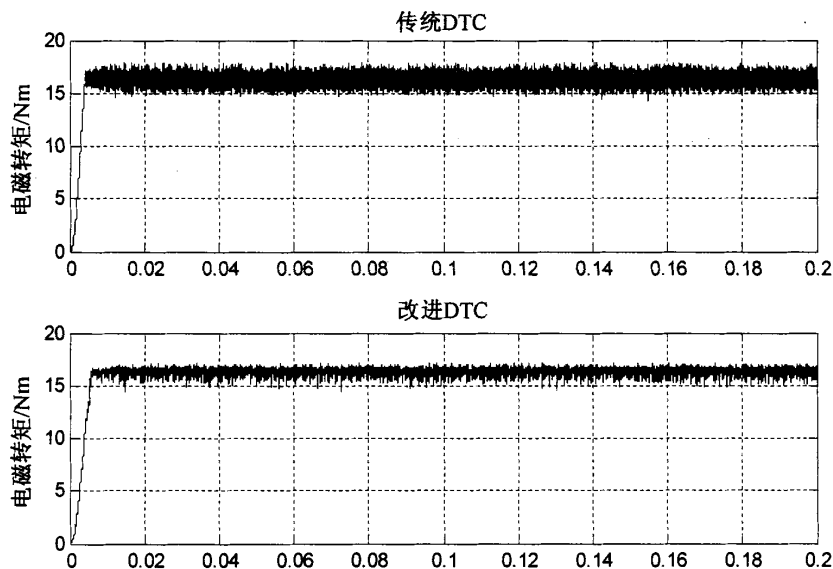


图 3.8 电磁转矩的仿真结果  
Fig. 3.8 The simulation results in torque

(2) 转矩偏差的仿真结果如图 3.9 所示（图中横坐标表示时间，单位  $s$ ）。

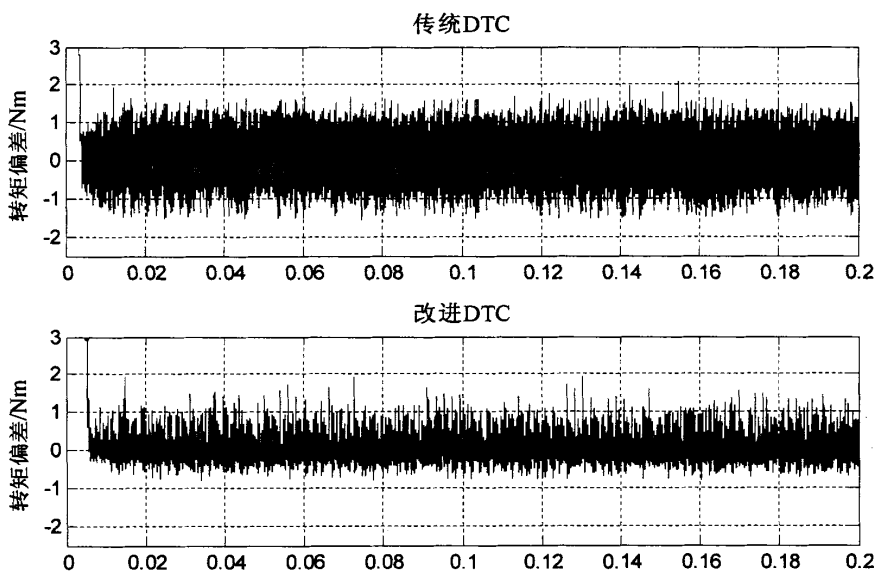


图 3.9 转矩偏差的仿真结果  
Fig. 3.9 The simulation results in torque deviation

(3) 三相定子电流的仿真结果如图 3.10 所示（图中横坐标表示时间，单位为  $s$ ）。

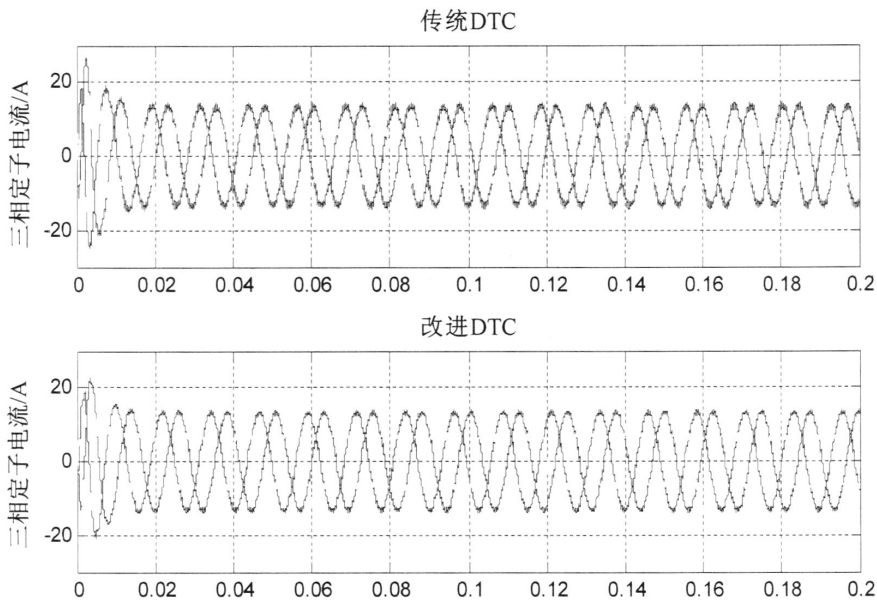


图 3.10 三相定子电流的仿真结果  
Fig. 3.10 Three-phase stator current simulation results

从图 3.10 能够看出，本课题中提出的改进的直接转矩控制系统所输出的电磁转矩脉动显著降低。由图 3.9 转矩偏差仿真结果的比较可以看出：电磁转矩偏差区间传统直接转矩控制下，为  $-1.5 \sim 1.7 \text{ N} \cdot \text{m}$  内，而电磁转矩偏差区间在改善后的直接转矩控制下，为  $-0.7 \sim 1.4 \text{ N} \cdot \text{m}$  内。通过对比传统直接转矩控制和改进直接转矩控制的电磁转矩的仿真结果我们可以看到本课题中提出的改进直接转矩控制方法能够有效抑制系统输出电磁转矩的脉动。

通过对对比仿真结果的分析，可以看出，使用改进直接转矩控制方式输出的转矩脉动得到了很好的抑制，电流脉动也有所减小，这有利于异步电机风力机模拟效果的改善。

### 3.4.2 改进直接转矩控制的风力机模拟系统仿真

以实际风力机的原理为理论基础，通过选择合适的电动机与相应的控制策略，让它的转速、输出转矩二者间的关系与实际运行的风力机保持统一的关系对应，这就是风力机的模拟原理。可见，风力机模拟并非属于常规控制电机速度。风力模拟的工作原理是：用户首先需要给定风速，即通过计算机上的人机交互界面输入风速的具体数值，系统会对电机转速进行检测，计算机检测结果和风力机的特性计算出风力机所需要的机械转矩的输出值，与此同时计算机将此转矩传递给串行通信口的控制器，即送给 DSP 控制器，又因为控制器需要对不可控逆变变流器进行控制，所以系统又通过改进的直接转矩控

制算法产生相应的控制脉冲，得到控制脉冲后变流器开始对异步电机进行励磁，即可保证系统的输出转矩与风力机的输出转矩保持一致，风力机的模拟由此完成。采用改进直接转矩控制方法的风力模拟系统原理图如图 3.11 所示。

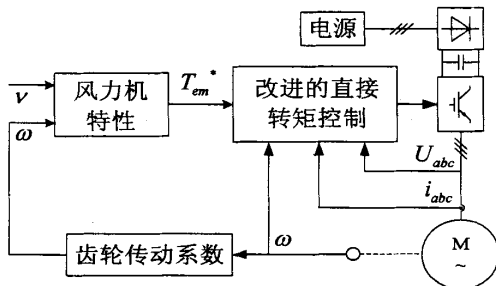


图 3.11 采用改进直接转矩控制方法的风力机模拟系统

**Fig. 3.11** Using an improved method of direct torque control wind turbine simulation system

应用本文提出的改进直接转矩控制方法,对异步电机的风力机模拟进行了仿真。模拟风力机的型号为 FD4.0-3000-E, 以下为其参数:  $U_N = 3kV$ ;  $R = 4.5m\Omega$ ;  $V_0 = 2m/s$ ;  $V_N = 10m/s$ ;  $V_A = 6m/s$ ;  $\omega_N = 220rpm$ ; 由于电机额定转速为  $1800rpm$ , 所以齿数比为  $8.2:1$  的齿轮箱。用 Matlab 仿真软件搭建模拟系统的结构图, 如图 3.12。仿真方法: 额定风速为  $10m/s$ , 由 0 开始提升电机的转速, 由第二章的分析可知这时风力机输出的即为风力机自身的转矩输出特征曲线 ( $10m/s$  风速)。仿真结果如图 3.13 所示 (横坐标表示时间, 单位  $s$ )。

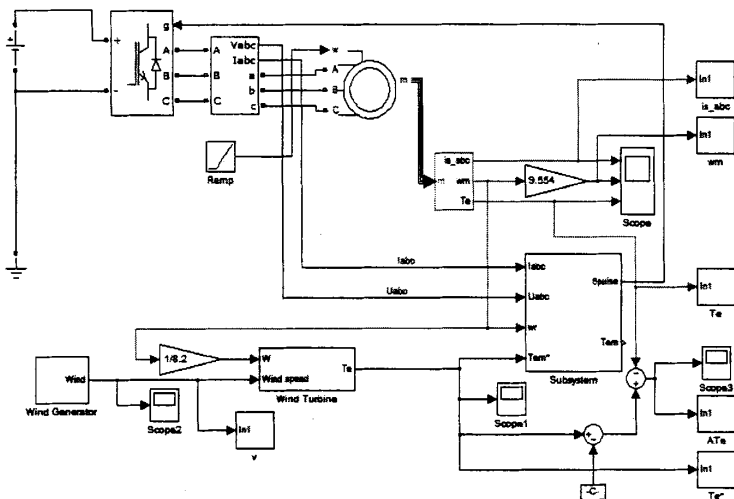


图 3.12 模拟系统的仿真平台

**Fig. 3.12 Simulation platform of simulation system**



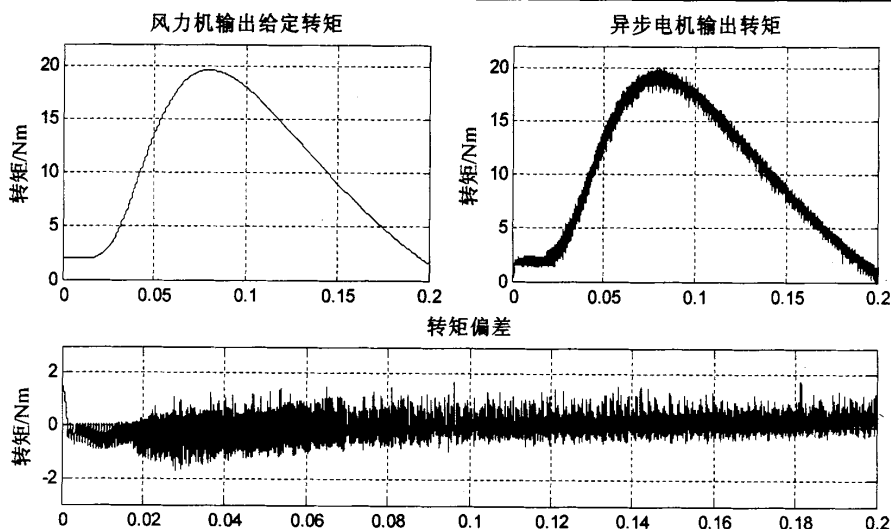


图 3.13 模拟系统的风力机、电机输出转矩及二者的转矩偏差

Fig. 3.13 Simulation of wind turbine systems, motor output torque and torque deviation between the two

通过分析仿真结果可以看出：风力机、异步电机的输出转矩大体上是一致的，其转矩偏差区域一般处于-0.8~1.5 内，偏差不大。通过分析我们初步得出结论：改进直接转矩控制适合于风力机的模拟。

### 3.5 本章小结

本章是对基于异步电机控制的风力机模拟进行的研究。首先，介绍了风力模拟系统，并详细说明了基于异步电机的风力模拟系统的运行原理，然后分析了直接转矩控制原理，并详细解释了转矩脉动是如何产生的；进而提出对直接转矩控制方法进行改进，并对直接转矩控制方法和改进的直接转矩控制方法用 Matlab 软件进行仿真分析，得出仿真结果，并对比这两种方法的控制效果，通过对比结果我们可以知道改进的直接转矩控制方法更适用于双馈风力发电模拟系统的风力机模拟，因为这种方法能明显改善电机输出转矩的脉动，最后又通过 Matlab 仿真结果分析，可知本课题提出的改进直接转矩控制方法适用于风力机的模拟。

## 4 双馈风力发电机侧并网控制研究

### 4.1 并网控制

#### 4.1.1 控制方式的选择

能够安全、可靠地输送电能是风力发电的最终目的。只有在输出定子电压的频率和幅值以及相位与将要并网的系统维持基本相同时,才能保证风力发电系统所发出的电能向电力系统输送。而要完成这个目标,必需对风电系统展开有效的控制。

风力发电系统在向系统输送电能时最普遍的问题是系统发电机的定子电流出现波动。实际运行当中,这种波动十分明显,甚至会对电力系统形成强大的冲击,导致电力设施的损毁。由于传统的风力发电系统容量不大,发电机定子产生的冲击电流微乎其微,但近年来风力发电技术不断得到改善,风力发电系统容量也逐渐升高,因此,风电系统在实现并网时的瞬间产生的定子冲击电流已不容小视,否则,必然会影响到风力发电本身的发展。所以,我们必须运用恰当的并网控制形式把风电并网过程中产生的冲击电流降到最小。

实际运行过程中,因为异步发电机转子转速必需确保位于同步转速周围,因此从本质来看,课题所需的控制是一种恒速恒频控制。与常规感应发电机不同,双馈感应发电机的转子和定子通过由两个用直流连接的背靠背电源变换器相连接。发电机的转子回路馈入转子侧变换器,转子变换器的运行相当于在转子回路中串联了一个外部电压相量,通过控制该电压相量,可以使转子达到预期的转速。通过转子侧变换器可以对风电机组的有功功率和无功功率进行解耦控制。这样发电机就可以用转子侧变换器来控制转子回路励磁,而不必通过电网励磁。这样我们就可以通过设置发电机的参数来控制发电机的定子侧,从而完成定子侧的并网。

双馈风电系统所普遍运用的并网控制方式,依照其并网之前的定子侧有没有和单独的负载连接来划分,包括空载并网与负载并网两种方式<sup>[16]</sup>:

(1) 空载并网方式。这种方式在并网之前双馈感应发电机的定子端负载的没有连接独立的三相线,没有回路形成,也就是说定子侧的电流为 0,也就是说,这种控制方式的控制系统仅仅调节定子侧空载电压;

(2) 负载并网方式。这种方式在并网前双馈感应发电机的与独立负载连接,定子电

流不为 0，其控制系统会同时调节对定子侧的电压、电流。

负载并网控制方式这具有一定的能量调节功能，并且能调节电机的转速，因此本课题将采用负载并网控制方式。

#### 4.1.2 控制策略的分析及其选择

由于双馈电机模型极为复杂，所以想要对这种电机的控制难度很大。现在控制这种电机的主要办法是运用坐标变换来解耦控制的矢量控制策略。这种矢量控制法包括：其一，把定子电压当成  $d$  轴定向变量的定子电压矢量定向这方面的控制措施；其二，把定子磁链作为  $d$  轴定向变量的定子磁场矢量定向的控制策略。

双馈式感应发电系统如果采用定子磁场定向控制策略，有以下几点不足之处：首先，所观测到的磁链是不够准确的。其次，定子侧的有功、无功两种功率存在较强的耦合性，如果定子电阻不能忽略，那么此类功率耦合性将会表现得更强，正是因为这种耦合，使得定子电压矢量和磁矢量不垂直于所述链条，这将导致在  $d$  轴和  $q$  轴定子电压矢量具有一个组件，这导致定子侧有功和无功功率无法解耦。

综上，本课题将选择定子电压矢量来实现双馈风力发电模拟系统和并网侧的控制。

### 4.2 定子电压矢量定向的负载并网控制

负载控制系统使用时，并网前单个独立负载受到发电机定子端的控制，定子端有电压，同时电流非 0，系统对定子端电流进行控制，且控制、调节定子电压。

$$D\psi_{ds} = D\psi_{qs} = 0 \quad (4.1)$$

又有：

$$\begin{cases} U_{ds} = U_s \\ U_{qs} = 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

其中  $U_s = \sqrt{U_{ds}^2 + U_{qs}^2}$ 。

将式 (4.1) 与 (4.2) 代入式 (2.15)：

$$\begin{cases} \psi_{ds} = 0 \\ \psi_{qs} = -\frac{U_s}{\omega_1} \end{cases} \quad (4.3)$$

将式 (4.3) 代入式 (2.16)：

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = \frac{L_m}{L_s} i_{qr} + \frac{U_s}{L_s \omega_1} \end{cases} \quad (4.4)$$

将式 (4.4) 代入式 (2.16) :

$$\begin{cases} \psi_{dr} = \sigma L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = \sigma L_r i_{qr} - \frac{L_m U_s}{L_s \omega_1} \end{cases} \quad (4.5)$$

式中  $\sigma$  ——电感参数。

把式 (4.5) 代入式 (2.15) 得:

$$\begin{cases} U_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} + L_m \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_s \left( \frac{L_m U_s}{L_s \omega_1} - \sigma L_r i_{qr} \right) \\ U_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} + L_m \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_s \sigma L_r i_{dr} \end{cases} \quad (4.6)$$

又由电网稳定, 可得:

$$\begin{cases} U_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} + \omega_s \left( \frac{L_m U_s}{L_s \omega_1} - \sigma L_r i_{qr} \right) \\ U_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_s \sigma L_r i_{dr} \end{cases} \quad (4.7)$$

由式 (4.7) 可得:

$$\begin{cases} U_{dr}^* = \left( K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \right) (i_{dr}^* - i_{dr}) + \omega_s \left( \frac{L_m U_s}{L_s \omega_1} - \sigma L_r i_{qr} \right) \\ U_{qr}^* = \left( K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \right) (i_{qr}^* - i_{qr}) + \omega_s \sigma L_r i_{dr} \end{cases} \quad (4.8)$$

式中  $U_{dr}^*$  —— $d$  轴转子电压给定;

$U_{qr}^*$  —— $q$  轴转子电压给定

$K_{pi}$  ——PI 电流调节器比例系数;

$K_{ii}$  ——PI 电流调节器积分系数;

$i_{dr}^*$  —— $d$  轴转子电流给定;

$i_{qr}^*$  —— $q$  轴转子电流给定。

对  $d$ 、 $q$  轴转子的电流分析, 可得:

$$\psi_s = L_m i_{ms} \quad (4.9)$$

$$\text{其中 } \psi_s = \sqrt{\psi_{ds}^2 + \psi_{qs}^2}。$$

由式 (4.4) 与式 (4.9) 得转子电流给定值:

$$\begin{cases} i_{dr}^* = \frac{L_s}{L_m} i_{ds} \\ i_{qr}^* = \frac{L_s}{L_m} i_{qs} - i_{ms} \end{cases} \quad (4.10)$$

本课采用空间矢量脉宽调制策略, 这是由于空间矢量脉宽调制策略在以下几个方面优于一般的脉宽调制策略: 首先空间矢量脉宽调制策略比脉宽调制策略在直流利用率方面增加了约 15%; 其次, 空间矢量脉宽调制控制策略的控制方式简单, 在各采样周期中, 其电压控制矢量是由空间电压矢量合成产生的, 从而降低了自身谐波的输出量; 最后, 空间矢量脉宽调制策略能把开关频率、损耗之间的矛盾减轻。

通过上面的分析, 我们可以得到如图 4.1 所示控制策略结构图。

接下来, 对图 4.1 的具体控制过程进行分析。

如图, 整个控制系统信号处理过程如下: 电网三相电压先行全面检测, 且把电压值当成定子电压控制方向, 随后变换静止坐标, 重复通过极变换获得当前相角  $\theta_s$ 、电网电压矢量幅值  $U_s$ , 计算得  $\theta_s$  (相角) 的导数, 定为  $\omega_1$  (同步角速度), 然后由关系式 (4.10), 得到  $d$  轴和  $q$  轴的分量参考值  $i_{dr}^*$ 、 $i_{qr}^*$ , 随后进入转子电流控制环内, 把  $i_{dr}^*$ 、 $i_{qr}^*$  两相相减, 把它们的差值通过 PI 调节器, 然后各自和相应电流耦合量相加, 得到  $U_{dr}^*$ 、 $U_{qr}^*$ , 随后, 运用坐标变换, 得到给定参考值  $U_{\alpha r}^*$ 、 $U_{\beta r}^*$  (两相静止坐标系下), 再运用空间矢量脉宽调制策略调制策略分析  $U_{\alpha r}^*$ 、 $U_{\beta r}^*$ , 通过驱动电路, 得到六路转子侧变换器的控制脉冲信号最终获得, 经过驱动电路, 实现对双馈式感应发电机的基于定子电压矢量定向的负载并网控制。

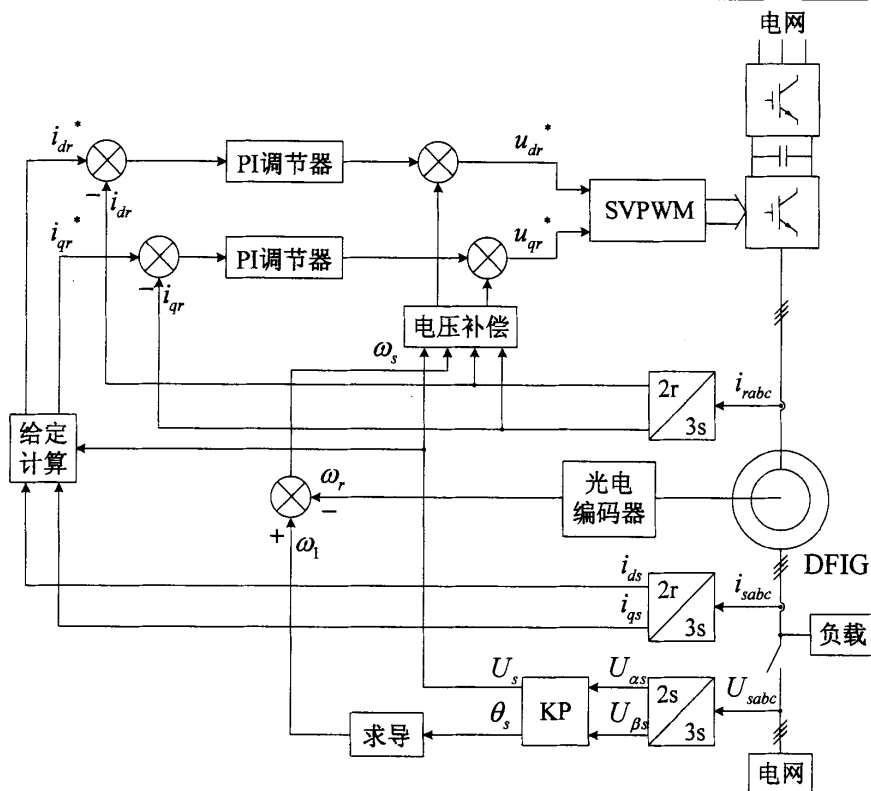


图 4.1 定子电压矢量定向的负载并网控制方式

Fig. 4.1 Stator voltage vector orientation load and network control

### 4.3 基于比例-谐振调节器的控制方式

#### 4.3.1 比例-谐振调节器的特性分析

通过上一节的分析, 可得下式成立:

$$\begin{cases} u_{dr} = (R_r + L_r D) i_{dr} + \omega_s \left( \frac{L_m U_s}{L_s \omega_1} - \sigma L_r i_{qr} \right) \\ u_{qr} = (R_r + L_r D) i_{qr} + \omega_s \sigma L_r i_{dr} \end{cases} \quad (4.11)$$

通过对上式分析我们知道：转子电流的 $d$ 、 $q$ 分量控制关系方程中的相应 $q$ 、 $d$ 组分耦合项在控制系统中的过程耦合的量，我们可以将耦合量看作系统的扰动量。基于以上分析我们得到如下图所示的具体的转子电流线性控制系统结构图<sup>[16]</sup>。

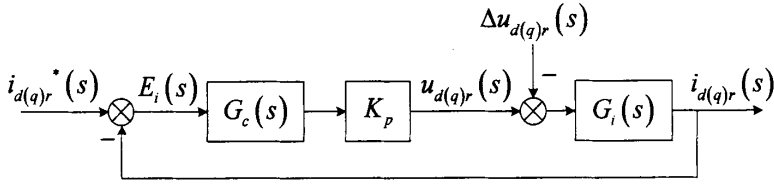


图 4.2 转子电流控制系统

Fig. 4.2 Rotor current control system

图中  $\Delta u_{d(q)r}(s)$ ——系统的扰动量；

$G_c(s)$ ——调节器的传递函数；

$K_p$ ——变流器的等效增益；

$G_i(s)$ —— $G_i(s) = \frac{1}{R_r + L_r s}$ 。

通过对结构图的分析 and 计算，得系统的误差量：

$$E_i(s) = \frac{R_r + L_r s}{R_r + L_r s + K_p G_c(s)} i_{d(q)r}^*(s) + \frac{1}{R_r + L_r s + K_p G_c(s)} \Delta u_{d(q)r}(s) \quad (4.12)$$

其中  $\frac{R_r + L_r s}{R_r + L_r s + K_p G_c(s)} i_{d(q)r}^*(s)$  和  $\frac{1}{R_r + L_r s + K_p G_c(s)} \Delta u_{d(q)r}(s)$  都是偏差值，分别是

给定偏差与扰动偏差。

(2) 采用比例-谐振调节器后，有

$$|G_c(s)| = \sqrt{k_p^2 + \frac{k_i^2}{0}} \rightarrow \infty \quad (4.13)$$

传递函数为：

$$G_c(s) = k_p + \frac{2k_r s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (4.14)$$

式中  $k_r$ ——谐振系数；

$\omega_0$ ——谐振角频率。

当  $s = j\omega_0$  时，由公式 (4.15)，可得下式：

$$|G_c(s)| = \sqrt{k_p^2 + \left( \frac{2k_r s}{-\omega_0^2 + \omega_0^2} \right)^2} \rightarrow \infty \quad (4.15)$$

通过分比例-谐振调节器的原理我们可以知道：应用比例-谐振调节器仅需要统一要求频率和谐振频率，就能在理论上无差控制此类频率交流信号。

### 4.3.2 自适应比例-谐振调节器的控制系统的仿真

从上一节的分析我们能够看出：基于双馈风电系统机侧负载并网控制，控制系统要求在并网的瞬间，双馈风力发电机电网电压、定子侧电压频率、幅值与相位相同，同时，定子电压频率必需是工频频率。选择自适应比例-谐振调节器，并将其谐振频率设定为根据目前转子电流频率的要求而变化，从上一节的分析我们可以知道，要获得目前频率所需要的转子电流信号，比例-谐振的增益很高，但对其它频率转子电流信号来说，比例-谐振调节器的增益却并不高，所以，能够滤除去定子电流内不必要的频率信号，把定子电流输出质量（控制系统输出）提升，由此可以使负载并网得到完善。因此，本课题选用带有自适应比例-谐振调节器的负载并网控制系统。本课题选用的自适应比例-谐振控制系统结构图与传递函数如下：

$$G_c(s) = k_p + \frac{2k_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (4.16)$$

式中  $\omega_c$  ——截止频率。

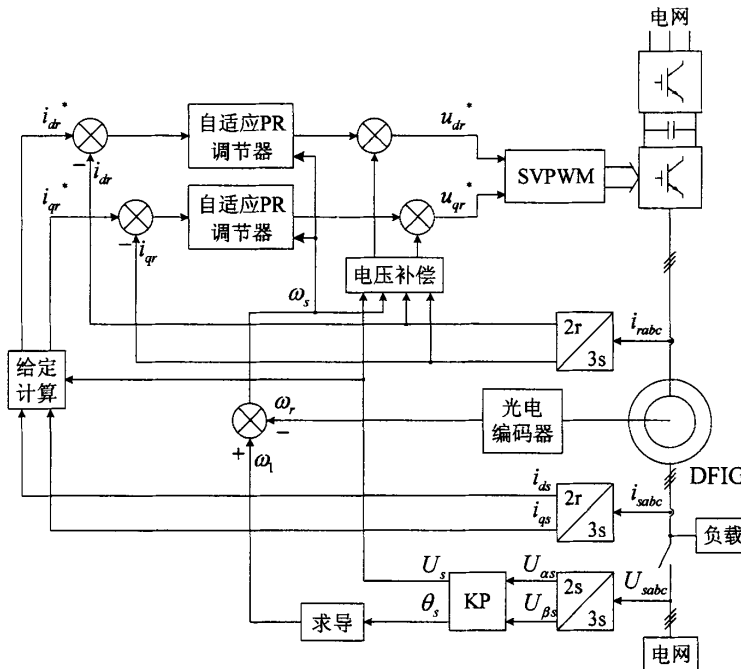


图 4.3 自适应比例-谐振调节器负载并网控制系统

Fig. 4.3 Adaptive proportional - resonant controller workload and network control system

下面根据仿真结果分析此控制系统的原理。

将图 4.1 与图 4.4 结合分析，电网电压通过系统的检测后进行极坐标变换得电网电压



相角  $\theta_s$ 、电压矢量幅值  $U_s$ 。求  $\theta_s$  的导数得到  $\omega_1$ ，与转子转速  $\omega_r$  结合，可得转差角速度  $\omega_s$ ，随后依据 (4.10) 式计算，得转子电流  $d$ 、 $q$  轴分量参考值  $i_{dr}^*$ 、 $i_{qr}^*$ 。进入转子电流环，将转子反馈电流、两相电流参考值在两相同步旋转坐标系中  $d$ 、 $q$  分量  $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$  相减，偏差值通过控制参数件  $\omega_s$  改变对比例-谐振电流调节器进行自适应，求得它们耦合量之和，则可得转子电压  $d$ 、 $q$  轴给定参考值  $U_{dr}^*$ 、 $U_{qr}^*$ ，随后通过坐标变换，得两相静止坐标系下转子电压的电压给定参考值  $U_{ar}^*$ 、 $U_{\beta r}^*$ ，再运用空间矢量脉宽调制策略调制策略分析、调制所获得的电压给定参考值  $U_{ar}^*$ 、 $U_{\beta r}^*$ ，并通过电路驱动，获得转子侧变换器控制脉冲信号，最终实现采用自适应比例-谐振调节器的变速恒频双馈风力发电系统机侧负载并网控制。图 4.4 是此控制系统的仿真平台。

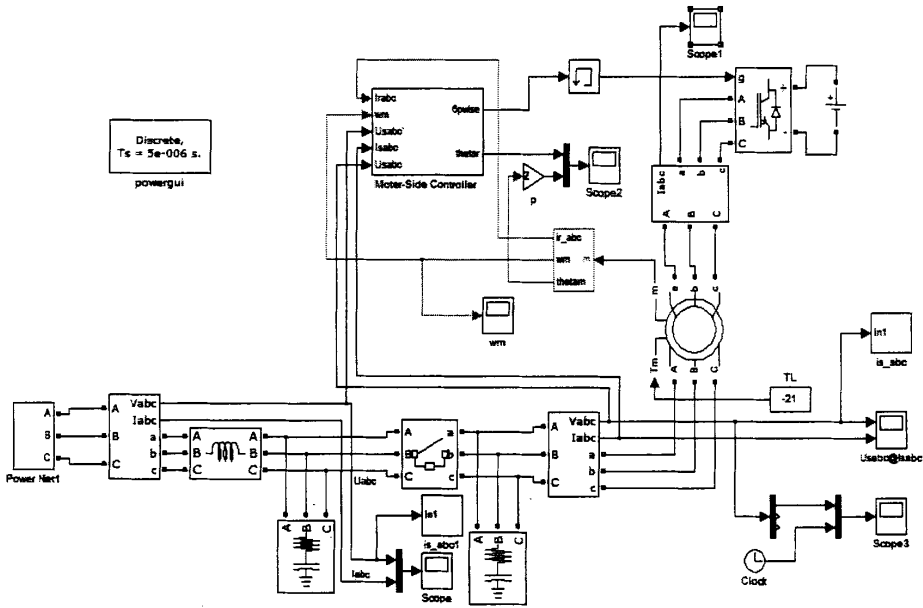


图 4.4 双馈风力发电系统机侧负载并网控制系统

Fig. 4.4 Double-fed wind power generation system-side load and network control system

系统的电机参数如下： $P_N=3000\text{W}$ ； $U_N=380\text{V}$ ； $f_N=50\text{Hz}$ ； $R_s=3.65\Omega$ ； $L_s=0.006\text{H}$ ； $R_r=4.35\Omega$ ； $L_r=0.0076\text{H}$ ； $L_m=0.2\text{H}$ ； $p=2$ ； $J=0.014\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

由式 (4.16)，调整调节器参数后，得到如下参数： $k_p=50$ ； $k_r=1000$ ； $\omega_c=1$ 。得到的仿真结果如下。

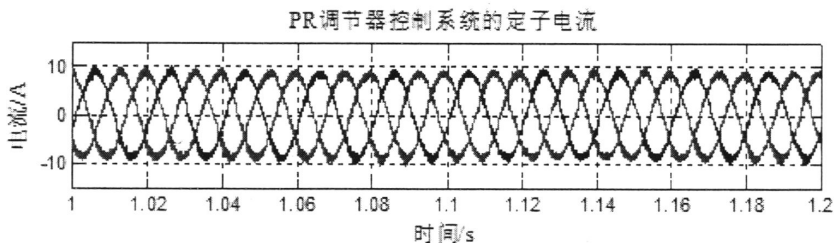


图 4.5 采用比例-谐振调节器的系统定子电流  
Fig. 4.5 Proportional - resonant regulator system stator current

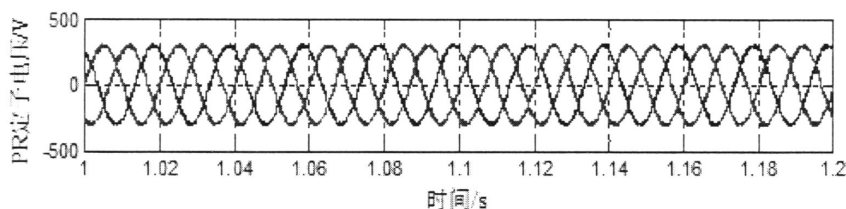


图 4.6 采用比例-谐振调节器的系统定子电压  
Fig. 4.6 Proportional - resonant stator voltage regulator system

由图 4.5、图 4.6，得到的结论是：基于定子电压矢量定向负载并网控制双馈风力发电系统，最终使电网电压、发电系统所输出的定子电压相位、幅值、频率大致相似，发电系统所输出的定子电流平稳，也就是说在风力发电系统中应用该调节器，能够满足系统并网的需要。

#### 4.4 本章小结

本章是对双馈风力发电模拟系统机侧并网控制进行的研究。通过比较、分析传统的双馈发电系统并网控制策略，课题决定选用基于定子电压矢量定向负载并网控制策略；然后对此种策略进行了详细分析；并用 Matlab 仿真软件对自适应比例-谐振调节器的系统进行仿真，由仿真结果，我们看出，使用了自适应比例-谐振的并网控制系统能改善并网效果，所以本课题决定选择基于自适应比例-谐振的并网控制系统。

## 5 双馈风力发电模拟系统机侧最大功率追踪控制研究

### 5.1 系统最大功率追踪原理

系统最大功率追踪是指在最大功率点跟踪发电机的转速的调节过程，这个调节过程的最终目标是使转速达到最佳值。通过第二章中对风力机原理的分析，我们知道：当倾斜度恒定的时候，有一个最适合的叶尖速比 $\lambda_{opt}$ ，使系统在风速为定值的情况下有相对应的唯一的机械转速。

如果此时来风的速度发生了变化，则风力发电系统从 $A$ 点变化至 $B$ 点运行。但是由于调节的滞后性和转子自身的惯性，电磁功率还在 $A$ 点。风力机的机械功率会大于发电机电磁功率，如果转速同步，因为功率区别引起转速变化率成正值，也就是电机转速增大，风力机会沿风力机特征由 $B$ 点变为 $C$ 点，控制系统控制的控制由 $A$ 点变为 $C$ 点。 $C$ 点处发电机电磁功率、风力机机械功率重新达到平衡，由式 2.10 可以看出，这时的转速变化率是 0，系统重新运行于最大功率点处。

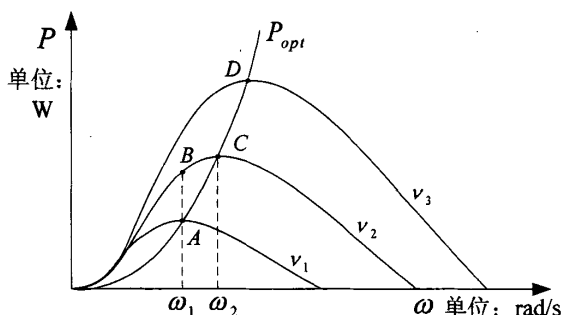


图 5.1 最大功率追踪过程

Fig. 5.1 Maximum power point tracking process

根据系统给定的不同双馈风力发电机侧最大功率控制主要可分为以下两种方式<sup>[17]</sup>：第一，速度控制方式。此种方式是有针对性的，并且与风速具有良好的相关性。这个控制点确实高风速监测系统的要求，从而提高了系统的成本，但对风速在每个位置上的风扇叶片是不相同的精确测量的风速是不容易的。第二，间接控制方式。从第二章的分析可知，桨距角一定，各风速均有唯一转速与之相对应，使得风力机输出为最大功率，图 2.1 中连接各种风速所对应的最大功率点，获得风力机最大功率曲线 $P_{opt}$ ，经过对发电机控制，确保风力机一直处于最大功率曲线 $P_{opt}$ 上运行是间接速度控制方式的本质，此时

功率最大值为<sup>[17]</sup>:

$$P_{\max} = k_{\omega} \omega^3 \quad (5.1)$$

式中  $k_{\omega} = 0.5 \rho S (R / \lambda_{\text{opt}})^3 C_{p\max}$ ,

$k_{\omega}$ ——最大功率系数,

$S$ ——风轮扫过的面积。

## 5.2 直接速度控制方式

### 5.2.1 转速与无功外环的设计方法

分析直接速度控制时我们运用的是双环控制策略(基于定子磁链矢量定向的)。运用间接速度控制环做内环、运用转速及无功功率控制环做外环。把定子磁链于  $d$  轴上(两相旋转坐标系内)定向, 那么:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = \psi_s \\ \psi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

式中  $\psi_s = \sqrt{\psi_{ds}^2 + \psi_{qs}^2}$ 。

由式 (5.2) 可知,  $\psi_{ds}$  与  $\psi_{qs}$  皆为恒定值, 则:

$$D\psi_{ds} = D\psi_{qs} = 0 \quad (5.3)$$

把式 (5.2) 与 (5.3) 分别代入 (2.15), 则有:

$$\begin{cases} U_{ds} = 0 \\ U_{qs} = \omega_1 \psi_{ds} \end{cases} \quad (5.4)$$

又由  $\sqrt{U_{ds}^2 + U_{qs}^2} = U_s$ , 得:

$$\begin{cases} U_{ds} = 0 \\ U_{qs} = U_s \end{cases}, \begin{cases} \psi_{ds} = \frac{U_s}{\omega_1} \\ \psi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

将上式转换整理, 可得:

$$i_{ds} = \frac{Q_s}{U_s} \quad (5.6)$$

同时, 得到下式成立:

$$\begin{cases} i_{dr} = -\frac{L_s}{L_m} i_{ds} + \frac{U_s}{L_m \omega_1} \\ i_{qr} = -\frac{L_s}{L_m} i_{qs} \end{cases} \quad (5.7)$$

$$T_{em} = p \frac{U_s L_m i_{qr}}{\omega_1 L_s} \quad (5.8)$$

再由 (2.10)，不计  $K_g$ ，经整理可得：

$$i_{qr} = -\frac{\omega_1 L_s}{p U_s L_m} \left( J \frac{d\omega}{dt} + D_g \omega \right) + \frac{\omega_1 L_s T_L}{p U_s L_m} \quad (5.9)$$

将式 (5.6) 代入  $i_{dr}$  方程，可得：

$$i_{dr} = -\frac{L_s}{L_m U_s} Q_s + \frac{U_s}{L_m \omega_1} \quad (5.10)$$

结合公式 (5.9) 和 (5.10)，得出以下结论：首先，双馈感应发电机定子无功功率和转子电流  $d$  轴分量具有之间有一定的比例且需要加上一个补偿项，这个补偿项是恒定值；第二，转子的机械速度和当前的双馈感应发电机的比例关系，但也有差的关系的  $q$  轴分量，并且也需要加上一个补偿项，这个补偿项与风力机机械转矩相关。基于上述分析，本文将使用速度和无功功率解耦外形式设计系统，并有以下的关系成立：

$$\begin{cases} i_{qr}^* = -\left( K_{p\omega} + \frac{K_{i\omega}}{s} \right) (\omega^* - \omega) + \frac{\omega_1 L_s T_L}{p U_s L_m} \\ i_{dr}^* = -\left( K_{p\omega} + \frac{K_{i\omega}}{s} \right) (Q_s^* - Q_s) + \frac{U}{L_m \omega_1} \end{cases} \quad (5.11)$$

式中  $K_{p\omega}$ 、 $K_{i\omega}$ ——PI 比例系数与积分系数；

$\omega^*$ ——转速给定；

$Q_s^*$ ——定子无功功率给定；

$i_{dr}^*$ 、 $i_{qr}^*$ —— $d$ 、 $q$  轴转子电流给定，即转子电流内环的给定。

结论：课题将采用直接速度控制系统的系统控制外环。

## 5.2.2 转子电流内环的设计方法

由式 (2.15) 和式 (2.16) 变换可得下式成立：

$$\begin{cases} U_{dr} = R_r i_{dr} + D(L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) - \omega_s (L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) \\ U_{qr} = R_r i_{qr} + D(L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) + \omega_s (L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) \end{cases} \quad (5.12)$$

由式 (5.7), 得:

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{U_s}{L_s \omega_1} - \frac{L_m}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (5.13)$$

将式 (5.13) 代入式 (5.12) 可得:

$$\begin{cases} U_{dr} = \left[ R_r + D \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \right] i_{dr} + \left( \frac{\omega_s L_m^2}{L_s} - \omega_s L_r \right) i_{qr} \\ U_{qr} = \left[ R_r + D \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \right] i_{qr} + \left( \omega_s L_r - \frac{\omega_s L_m^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{\omega_s L_m U_s}{L_s \omega_1} \end{cases} \quad (5.14)$$

分析可得该系统的控制关系:

$$\begin{cases} U_{dr}^* = \left( K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \right) (i_{dr}^* - i_{dr}) + \left( \frac{\omega_s L_m^2}{L_s} - \omega_s L_r \right) i_{qr} \\ U_{qr}^* = \left( K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \right) (i_{qr}^* - i_{qr}) + \left( \omega_s L_r - \frac{\omega_s L_m^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{\omega_s L_m U_s}{L_s \omega_1} \end{cases} \quad (5.15)$$

式中  $U_{dr}^*$ 、 $U_{qr}^*$ —— $d$ 、 $q$  轴转子电压给定;

$i_{dr}^*$ 、 $i_{qr}^*$ —— $d$ 、 $q$  轴转子电流给定;

$K_{pi}$ 、 $K_{ii}$ ——比例系数与积分系数。

结论: 课题将根据本章的介绍来设计系统的控制内环。

### 5.2.3 直接速度控制系统的仿真

使用 Matlab 仿真软件对直接速度控制系统进行仿真, 得到的仿真平台如图 5.2。本课题运用阶跃风速来进行控制系统的动态响应过程分析, 阶跃风速如图 5.3 所示设起始风速为 7.5m/s, 于 4s 时阶跃至 11m/s。齿轮箱的传动系数为 80。

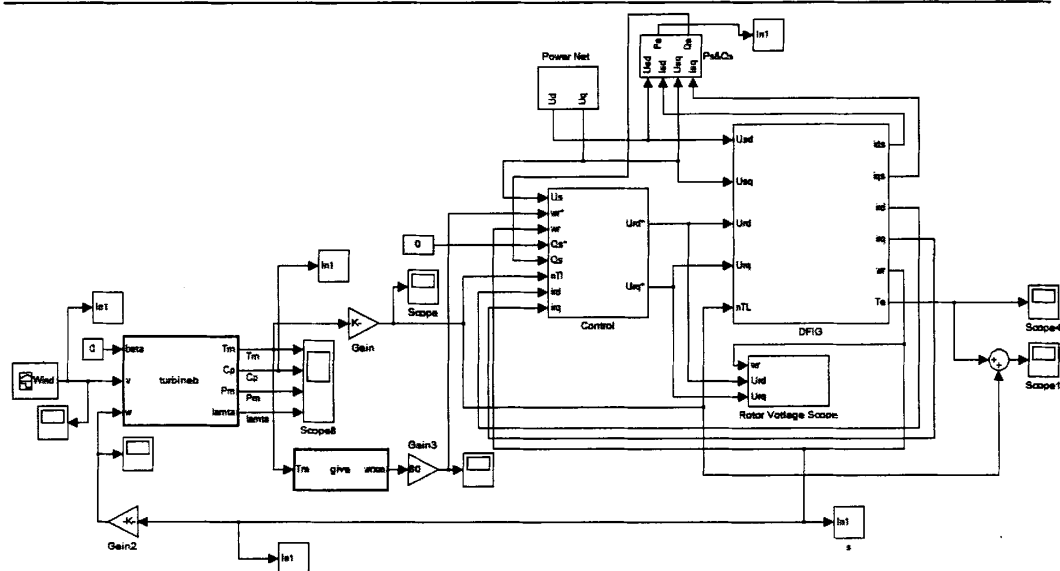


图 5.2 直接速度控制系统  
Fig. 5.2 Direct speed control system

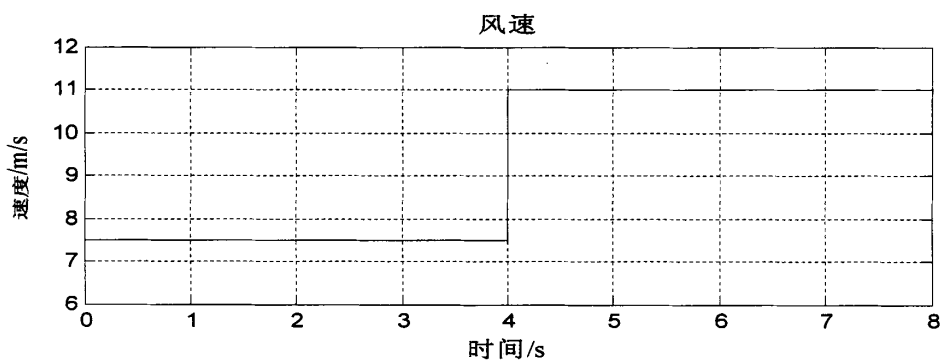


图 5.3 仿真所用的阶跃风  
Fig. 5.3 Wind step used in the simulation

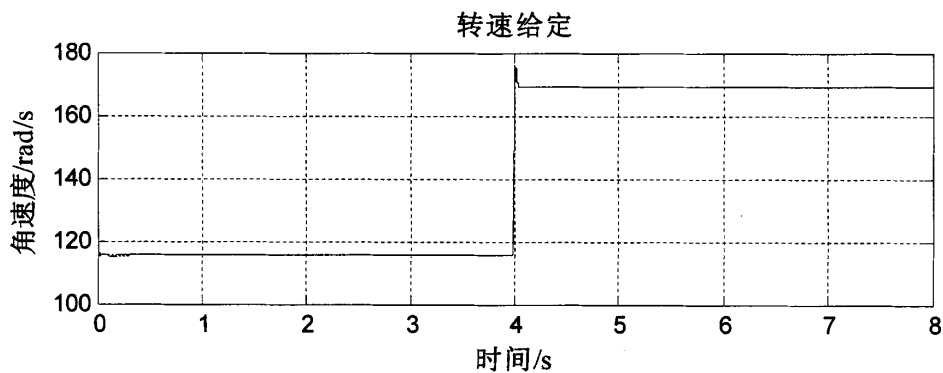


图 5.4 转速给定信号  
Fig. 5.4 Speed signal of reference

对比将风速信号、输出转速给定信号（转矩观测器）的仿真结果，我们可以看出转矩观测器实现了风电系统机械转矩的预测功能，并得到了转速给定值。

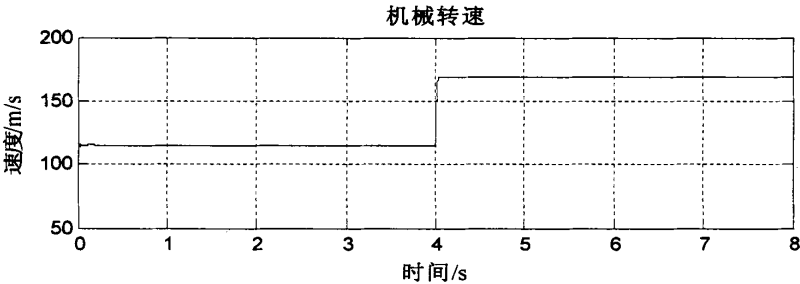


图 5.5 发电机的机械转速  
Fig. 5.5 Generator mechanical speed

对比输出转速给定信号（转矩观测器）和双馈风力发电机机械转速的仿真结果，我们可以看出电机机械转速对系统转速能迅速跟踪，调节转速动态过程用时约 0.1s 左右，实现了给定值而且转速只有一个微小的波动。通过以上分析，可以得出结论：直接速度控制的机械转速的响应迅速，能够实现快速跟踪系统转速给定的功能。

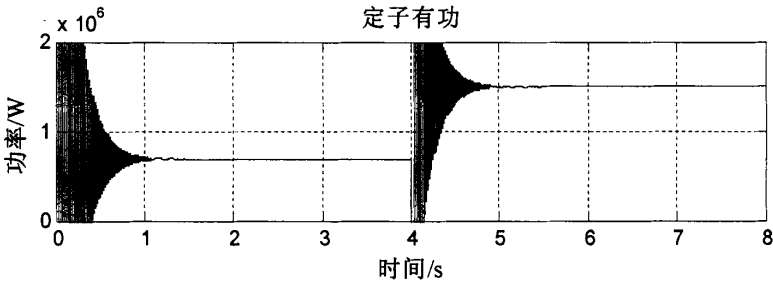


图 5.6 定子输出的有功功率  
Fig. 5.6 Stator active power output

通过对以上模拟结果的分析，可以得出结论：当风速变化较大时，直接速度控制系统的定子有功功率输出波动明显。

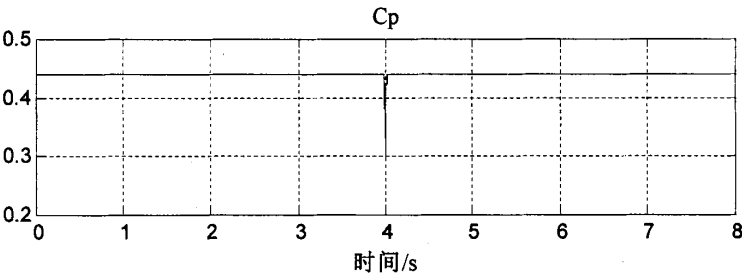


图 5.7 风能利用系数  
Fig. 5.7 Power coefficient map



以上分析表明：尽管风速变化时存在瞬时调节，不过能让系数  $C_p$  持续处于 0.44 这个最大值周围，也就是说，最大值风力机输出机械功率能够保持。

## 5.3 间接速度控制方式

### 5.3.1 有功与无功外环的设计方法

由式 (5.5) 和式 (2.18)，可得：

$$\begin{cases} P_s = U_s i_{qs} \\ Q_s = U_s i_{ds} \end{cases} \quad (5.16)$$

将式 (5.16) 变换，可得：

$$\begin{cases} i_{qs} = \frac{P_s}{U_s} \\ i_{ds} = \frac{Q_s}{U_s} \end{cases} \quad (5.17)$$

由式 (5.7) 和式 (5.17)，整理得：

$$\begin{cases} i_{qr} = -\frac{L_s}{L_m U_s} P_s \\ i_{dr} = -\frac{L_s}{L_m U_s} Q_s + \frac{U_s}{\omega_1 L_m} \end{cases} \quad (5.18)$$

由式 (5.18) 可得如下关系式：

$$\begin{cases} i_{qr}^* = -\left(K_{pp} + \frac{K_{ip}}{s}\right)(P_s^* - P_s) \\ i_{dr}^* = -\left(K_{pp} + \frac{K_{ip}}{s}\right)(Q_s^* - Q_s) + \frac{U_s}{\omega_1 L_m} \end{cases} \quad (5.19)$$

式中  $K_{pp}$ 、 $K_{ip}$ ——比例、积分系数；

$Q_s^*$ ——定子无功功率给定；

$P_s^*$ ——定子有功功率给定。

### 5.3.2 间接速度控制方式控制系统分析

通过分析得到间接速度控制系统的原理图如图 5.8。

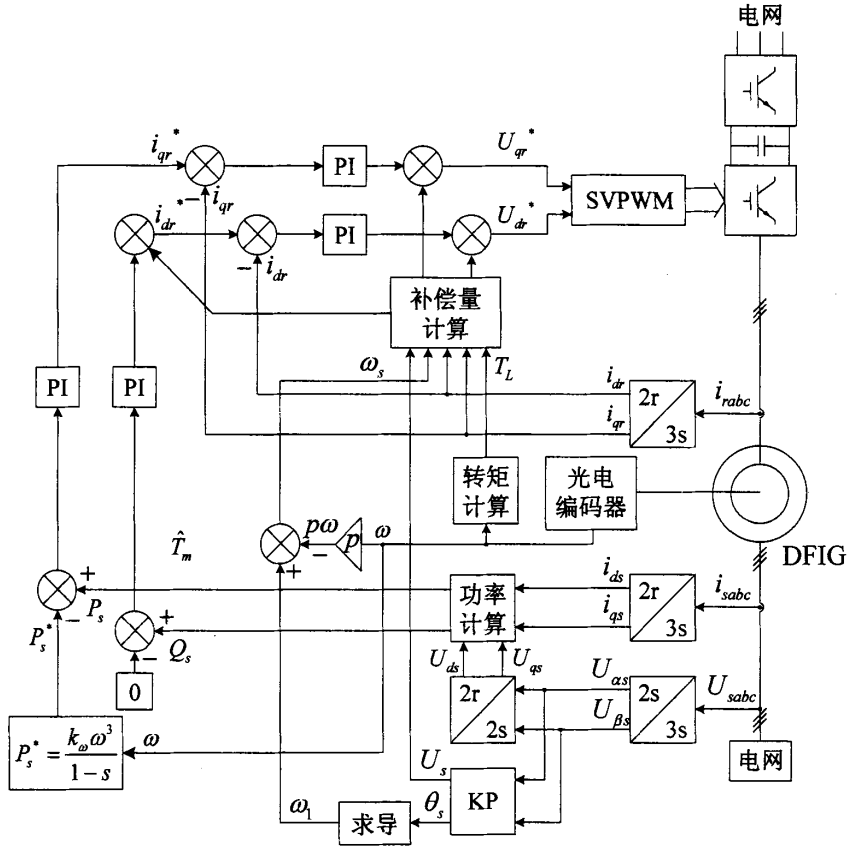


图 5.8 间接速度控制原理图  
Fig. 5.8 Indirect speed control schematic

发电机转速运用控制系统定子有功功率进行间接控制，运用的是定子有功、无功解耦设计间接速度控制外环。以下为信号处理（间接速度控制系统）步骤：首先，在  $d$ 、 $q$  坐标系上转换来定子电流、电压，把定子输出无功、有功功率计算出来，把它们当成外环控制功率反馈值；其次，坐标变换获得电网电压，再根据 (5.19) 式把有功功率给定值计算出来，设无功功率给定值为零，进入无功、有功解耦控制，控制外环完成开始将无功、有功偏差进行计算；最后，内环定子电流给定值经由调节器得到相应控制补偿量。

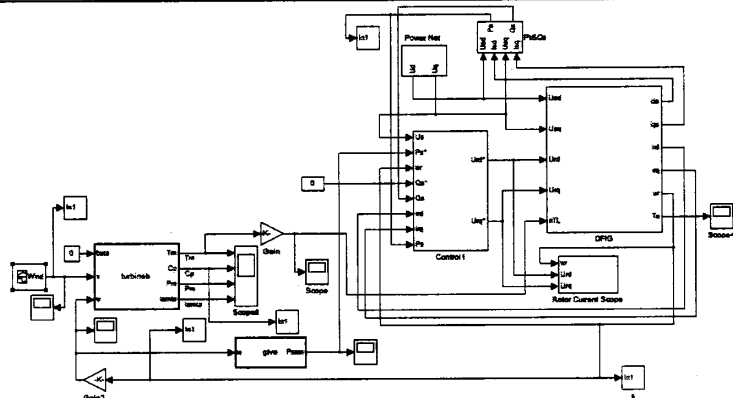


图 5.9 间接速度控制方式原理图  
Fig. 5.9 Schematic of indirect speed control

运用 Matlab 仿真软件，构建机侧间接速度控制系统如图 5.10 所示，间接速度控制系统同样运用阶跃风（意在和直接速度控制统一，便于对比其仿真结果）。下面分析各仿真结果。

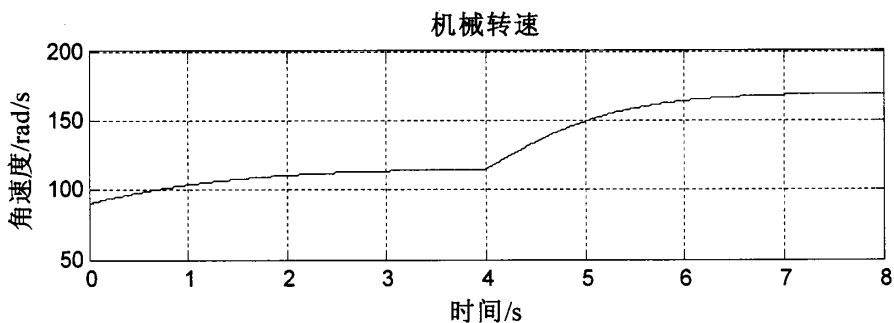


图 5.10 发电机机械转速  
Fig. 5.10 Generator mechanical speed

分析这个仿真结果我们可以发现：如果风速发生变化，转速在间接速度控制方式下，响应不迅速。原因如下：转速是经由控制定子输出有功功率，对转速进行间接控制，也就是说，没有受到间接速度控制方面的直接控制，如果风速改变瞬间，系统存在惯性，导致发电机转速无法马上进行响应改变，所以此时的发电机电磁转矩维持不变，但是因为风速改变导致风力机机械转矩同样产生变化，从(2.10)式来分析，因为存在着客观的转矩差，导致转速加速度不为0，转速改变，这种改变会持续至转矩差为0，发电系统自身的转动惯量决定着此转速调节所需时间的多少。

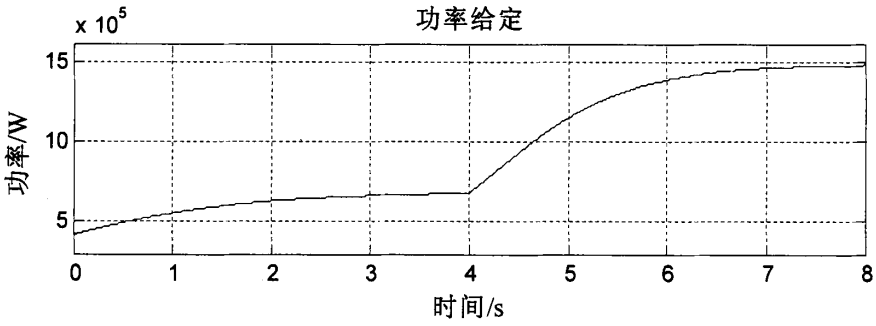


图 5.11 定子有功功率给定  
Fig. 5.11 Stator active power given

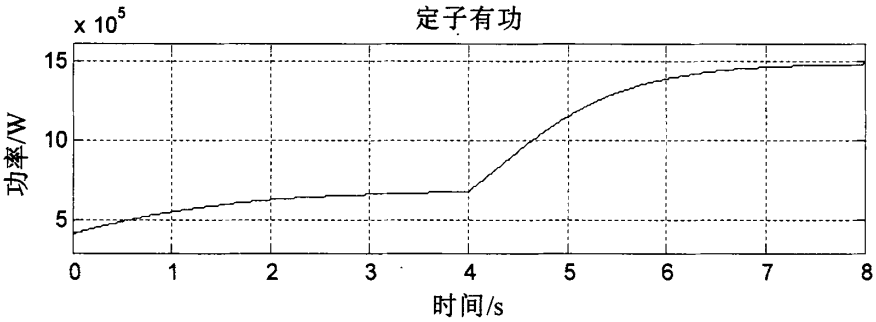


图 5.12 定子输出有功功率  
Fig. 5.12 Stator output active power

对比分析定子输出有功功率、定子有功功率给定信号的仿真结果，我们能够发现，功率给定能够被间接速度控制平稳、迅速的追踪到，但功率却并没有发生明显变化，原因在于，此类控制方式运用的是有功功率环，能够对电机定子有功功率实现直接的控制。

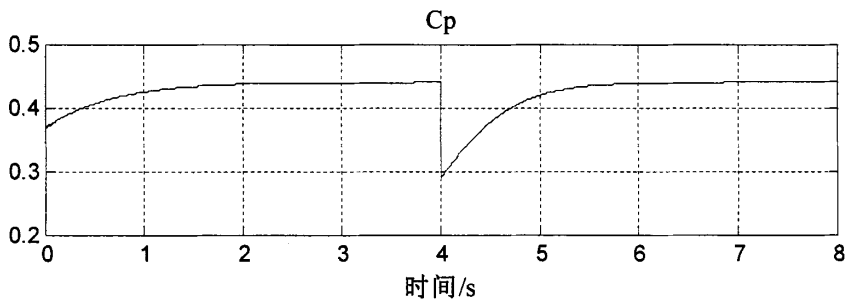


图 5.13 风能利用系数  $C_p$   
Fig. 5.13 Power coefficient  $C_p$

通过分析  $C_p$  的仿真结果可以得出结论：间接速度控制系统，实现了最大功率跟踪。因为风速是变化的，风力机在同一时间和风能利用系数的速度控制稳定在 0.44 附近的

佳值。

## 5.4 最大功率追踪控制方式研究

### 5.4.1 直接速度控制与间接速度控制的特点

通过上一节中对仿真结果的分析，总结两种控制方式特点，如表 5.1 所示。

表 5.1 直接速度控制方式与间接速度控制方式效果对比  
Table 5.1 Direct and indirect speed control speed control effect of contrast

控制方式	转速控制效果	能否跟踪给定	定子输出功率控制效果
直接速度控制方式	好	能	波动较大
间接速度控制方式	不好	不能	平稳无超调

下面对直接速度与间接速度控制方式的最大功率追踪控制优缺点进行详细分析：

(1) 直接速度控制方式对转速控制效果较好。这是因为直接速度控制系统在风速发生变化时电机转速可以快速跟踪给定；而间接速度控制这种控制方式如果说风速转变所需的动态过程相对比较长，这使得它无法完成快速的跟踪给定，不能有效的，或者说无法实现追踪控制风电系的统最大功率。

(2) 间接速度控制方式能较好地控制发电机定子输出功率。因为这种控制方式系统的加、减速功率引起定子输出有功功率的变化太过明显；但是，间接控制对有功功率能够完成直接的控制，因此，此类形式可以与系统给定变化保持同步，而且可以稳定地对系统进行调节。

根据上一节与本节的分析，对直接速度控制方式和间接速度控制方式的特性进行如下总结：直接速度控制的转速控制效果好，但会产生比较大的超调与震荡；间接速度控制虽然对转速控制效果差，而且无法快速跟随风速给定，但不会产生较大的超调与振荡。

### 5.4.2 双模控制方式的分析与研究

通过以上分析我们能够看出，间接速度与直接这两种速度的控制方式都有自身的长处与不足。所以，本课题研究过程中选择了双模控制理论<sup>[18]</sup>，即根据恰当的切换规则设

计, 结合间接、直接这两类速度控制的基本方式, 分别取这两类速度控制方式所具有的长处, 目的在于实现追踪控制双馈风电系统机侧最大功率的目标。

### 1. 切换条件

为了实现双馈风力发电系统最大功率追踪控制, 本课题将采用的切换条件是带滞环的变切换点切换条件, 采用这种滞环设置方式可以解决由于系统转速给定变化而带来的双模控制过早或过晚切换的问题, 因为存在滞环, 能够有效处理单点切换双模控制方面所发生的反复切换的问题。

通过滞环变换切点切换条件的基本原理图如下图 5.14。本课题所选用的切换条件的原理如下: 第一, 挑选 1 个转速偏差  $|\Delta\omega|$  以便将其当成系统的切换参照, 这里  $|\Delta\omega| = |\omega^* - \omega|$ , 属于既有机械转速、实际运行的发电机的机械转速二者的差。设置滞环的释放点为  $k_1\omega^*$ , 设置滞环吸收点为  $k_2\omega^*$ , 其中  $k_1$ 、 $k_2$  为固定参数且有  $k_1 > k_2$ , 由下图可知, 滞环特征值  $y$  随着滞环吸收点的变化而变化, 当  $|\Delta\omega|$  增大至大于  $k_1\omega^*$  时,  $y$  由 0 突变为 1; 当  $|\Delta\omega|$  减小至小于  $k_2\omega^*$  时,  $y$  又由 1 突变为 0。由此可以得出结论: 给定系统必需要在滞环吸收点、释放点设置之前加以考虑。

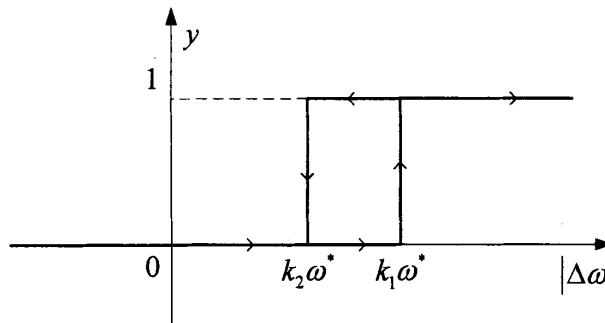


图 5.14 运用滞环的变切换点切换条件

Fig. 5.14 Using variable switching point hysteresis switching condition

### 2. 切换规则

分析前述切换条件, 我们挑选滞环设备来进行设计双模控制方式切换标准, 间接速度控制方式、直接速度控制方式这种双模控制形式属于此类双模控制的理论基础。图 5.15 是实现这种控制方式的控制规则的示意图, 下面简要介绍其控制规则的原理:

(1) 当  $y$  为 0 时, 速度控制系统采用一种间接的方式, 减少了稳态定子有功功率输出的振荡的过程。

(2) 当  $y$  值为 1 时, 表示更大的速度控制系统采用直接的方式来缩短时间来调整系统的动态过程。

式 (5.20) 是用数学语言对以上描述的阐述, 即

$$s_{dm} = y \cdot s_{DSC} + (1 - y) \cdot s_{ISC} \quad (5.20)$$

式中  $s_{dm}$  —— 双模控制信号;

$s_{DSC}$  —— DSC 控制信号;

$s_{ISC}$  —— SCI 控制信号。

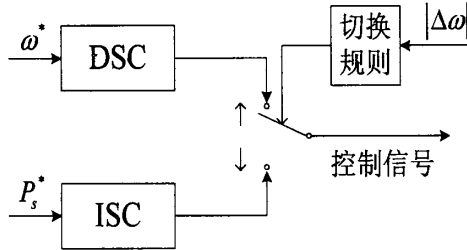


图 5.15 双模控制切换规则原理图

Fig. 5.15 Schematic dual-mode control switching rules

### 5.4.3 双模控制系统的设计

图 5.16 是双模控制方式的控制系的原理图。通过对直接速度控制系统和间接速度控制系统比可以看出, 直接速度控制系统和间接速度控制系统都采用控制量与定子无功功率的解耦控制的外环设计控制外环, 而且都采用了有相同的内环设计, 即转子电流环, 因此将双模控制器的控制输出与 DSC 系统 (或 ISC) 的转速 PI 调节器 (或有功功率 PI 调节器) 的控制输出对应, 即双模控制器的控制输出信号为转子电流  $q$  轴分量  $i_{qr}$  的给定信号  $i_{qr}^*$ , 由式 (5.25), 可得  $s_{dm} = i_{qr}^*$ 。

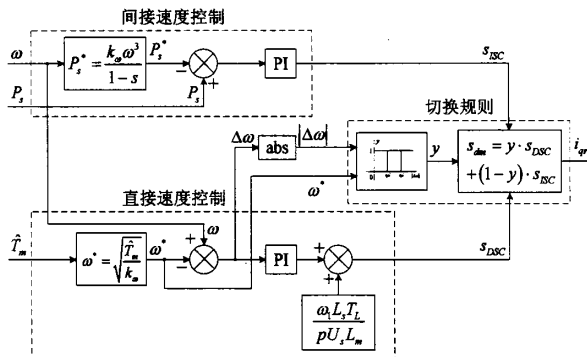


图 5.16 双模控制系统控制量切换结构图

Fig. 5.16 Dual control system controls the amount of map switching diagram

接下来从图 5.16 入手，对双模控制系统运行理论进行分析。基于设计双模控制系统完成所需，本课题结合了直接、间接速度控制下的控制有功功率、外环转速控制。具体原理如下：

(1) 统一直接速度及间接速度控制方式、内环转子电流环、系统外环定子无功功率控制。

(2) 系统的内环控制过程如下: 控制双模系统时, 我们首先调节发电机定子有功功率以及其机械转速, 由此给定信号  $s_{DSC}$ 、 $s_{ISC}$ , 即可得转子电流  $q$  轴分量  $i_{qr}$ , 随后, 根据双模控制切换规则, 对系统目前的运行情况展开相应的分析研究, 且把所得的结果代入 (5.25) 式, 此计算结果就是给定信号  $i_{qr}^*$ , 即转子电流  $q$  轴分量  $i_{qr}$ 。

#### 5.4.4 双模控制方式的仿真分析

用 Matlab 仿真软件建立课题中所采用的双模控制式控制系统,其仿真平台如图 5.17 所示。

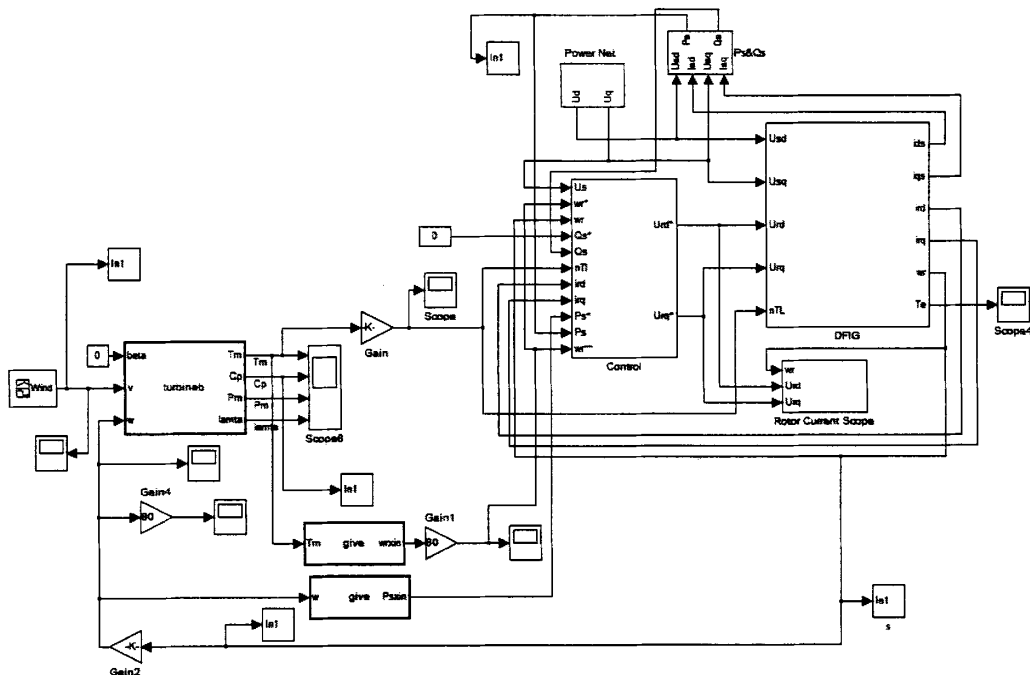


图 5.17 双模控制方式的结构图

**Fig. 5.17** The structure of dual control

仿真过程中同样使用图 5.3 中给出的阶跃风速,原因是这样有利于与间接控制系统、



直接速度性能之间的比较,下面我们来逐一研究分析图 5.18~图 5.21 中的全部仿真结果。

图 5.18 是仿真发电机机械转速结果。对比分析图 5.5、图 5.10 我们能够发现,发电机机械转速在双模控制系统控制下,动态响应效果良好,可以有效的把快速跟踪给定变化作用实现。与直接速度控制系统的动态性能相比较,此优点与直接速度控制系统相一致。

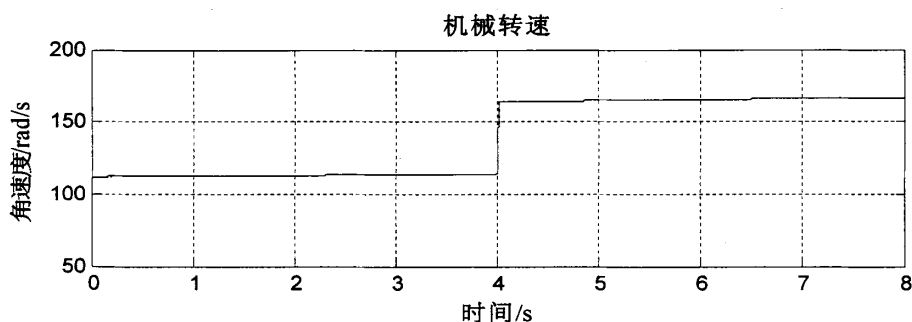


图 5.18 发电机的机械转速

Fig. 5.18 Mechanical speed of the generator

图 5.19 是定子所输出的有功功率的仿真结果。通过仿真结果我们可以明显看出,尽管切换点处存在着一些波动,但是,发电机定子输出功率在双模控制系统控制下,综合静态性能良好。

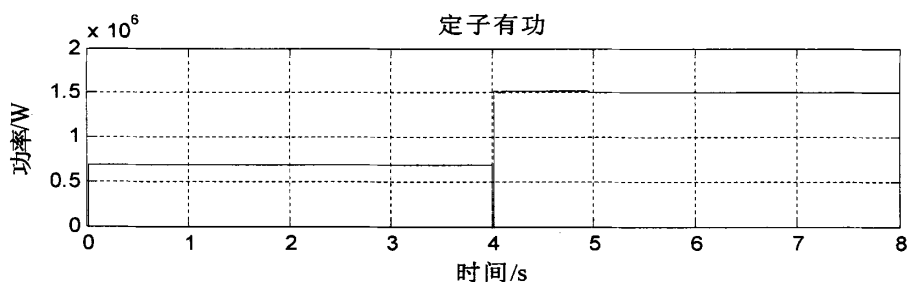


图 5.19 发电机定子输出的有功功率

Fig. 5.19 Active power output of the generator stator

图 5.20、图 5.21 分别是仿真风能利用系数  $C_p$ 、发电机转子电压的仿真结果,由此我们能够发现,尽管在风速变化明显时转子电压波形存在波动,不过,这种波动处于直接速度、间接速度控制系统内,它的变化波形总体来看呈现出稳定态势,换言之,追踪控制发电系统最大功率能够经由双模控制系统来得以完成。

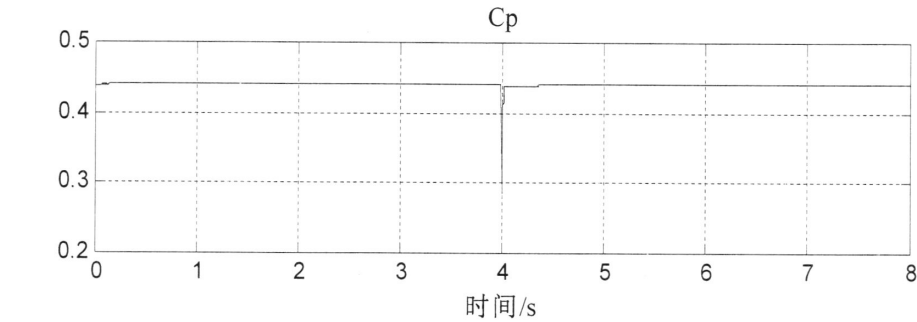


图 5.20 风力机的风能利用系数  $C_p$

Fig. 5.20 Wind energy utilization factor of wind turbines  $C_p$

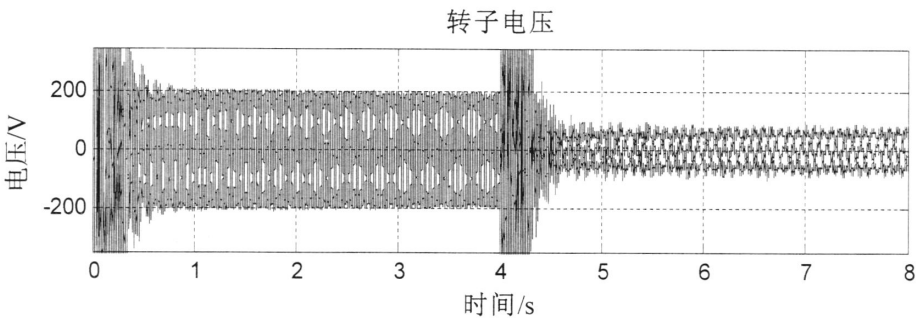


图 5.21 发电机转子三相电压

Fig. 5.21 Three-phase voltage generator rotor

分析本章中的仿真结果我们能够看出：课题中提出的双模控制法可以跟踪控制系统的最大功率，在机侧运用的好处在于：平稳、良好的性能控制（间接速度控制方式）、性能不错的动态控制（直接速度控制模式）都能获得有效的体现，这使得种控制形式可以有效结合，从而实现双馈风力发电系统机侧的最大功率点跟踪控制的改进。

### 5.5 本章小结

本章研究了双馈风电模拟系统机侧追踪控制最大功率控制。首先分析了 ISC（间接速度控制方式）、DSC（直接速度控制），并对 ISC、DSC 这两种控制的长处与不足进行了归纳；然后根据直接、间接这样两种速度控制本身所存在的长处与不足，在双模控制理论基础上，运用滞环切换，对两种追踪控制最大功率方式进行切换，通过 Matlab 仿真，对比、分析传统的间接与直接速度控制、双模控制，并通过仿真结果得出结论：本课题所选用的双模控制系统，能够改善双馈风力发电系统机侧的最大功率跟踪控制效果。

## 6 总结与展望

本文分析了基于风力机模拟的变速恒频双馈风力发电模拟系统的机侧控制策略，指出了当前风电系统机侧控制、风力机模拟方面的问题与完善措施。本课题主要得到以下几点结论：

(1) 研究了风力机模拟，通过对比风力机特征、异步电动机机械特征，本课题决定选用异步电机对风力机进行模拟，继而分析了直接转矩控制，鉴于以往运用的直接转矩控制出现较大转矩脉动这种现象，课题提出在各周期中给有效电压矢量内插入零矢量的方法，通过 Matlab 仿真软件对此控制方法的控制效果进行分析，并把完善后的直接转矩控制在风力机模拟中加以运用，仿真结果表明本课题使用的模拟方法得到了很好的控制效果

(2) 研究了双馈风电系统的机侧并网控制。通过分析当前并网控制笔者研究系统机本课题选择了基于定子电压矢量定向的负载并网控制策略。随后，本课题介绍了自适应比例-谐振调节器。并使用 Matlab 仿真软件对使用了自适应比例-谐振调节器的并网控制系统的控制效果进行仿真，仿真结果表明使用了自适应比例-谐振调节器的负载并网控制系统能够很好的改善并网控制效果。

(3) 研究了双馈风力发电系统机侧最大功率追踪控制策略，课题首先介绍了直接、间接速度两种控制方式的特点，通过 Matlab 仿真软件，对两种控制方式的特性进行对比，最终本课题决定采用双模控制理论。最后又通过 Matlab 仿真软件，对采用了双模控制的双馈式感应风力发电系统的机侧最大功率追踪进行了仿真，结果表明，双模控制系统的运用，很大程度上改善了控制效果。尽管还有一些不完善之处，相信随着学识、经验的不断发展，会获得有效改善。

本文后续工作展望：

本课题对双馈风力发电模拟系统的控制研究只是在实验室条件下进行的模拟，而且仅限于仿真阶段，能够分析的问题和最终得到的结论都是有待考究的，为了进一步分析和研究双馈风力发电模拟系统，还需要在实验室条件下建立风力发电的模拟平台，进行实验研究。

## 致 谢

两年充实的研究生学习生活终于要接近尾声，在此，我要向帮助过我的老师和同学送上最诚挚的感谢，在他们的帮助下，我才能顺利走完研究生的学习之路。

本文是在戴陶珍老师的悉心指导下完成的，能够在戴老师的教导下攻读硕士学位让我倍感幸运和感激。戴老师朴实无华、平易近人、真诚和蔼，他渊博的知识，严谨的治学态度，谦虚的作风让我受益匪浅。在戴老师的指导下不仅学到了大量的专业知识，还学到了很多做人的道理，桃李不言，下自成蹊，这应该是对戴老师最真实的写照。在此，谨向我的恩师表示最诚挚的感谢。

感谢在实验室中与我朝夕相处的的师兄师姐，感谢吕鹏师兄，纪妮妮师姐，李漫漫师姐，在这个温馨的大家庭里，师兄师姐教给我很多做人做事的道理，还要感谢我的舍友与同门，在完成论文的过程中给予我的意见与鼓励，感谢你们给我带来的快乐与感动，也祝愿你们能够在今后的学习生活中一帆风顺。

感谢我的母校和硕研 23 班的全体同学们，很荣幸有机会跟你们成为相亲相爱的一家人，让我感受到了大家庭的温暖。

最后，还要感谢我亲爱的家人，是他们的亲情陪着我走过这六年的大学生活。

由于我的知识水平有限，论文中的不足之处，希望老师们给予批评指正！

## 参考文献

1. 孙巍. 风电接入对电网的影响及对策研究[D], 山东济南: 山东大学, 2011.
2. 张学广. 变速恒频双馈风电机组并网控制策略研究[D], 黑龙江哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
3. 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]., 浙江杭州: 浙江大学, 2005, 116-156.
4. Fadaeinedjad. R, Moallem. M, Moschopoulos. G. Simulation of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator by FAST and Simulink[J], IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 690-700.
5. 刘纯. 变速恒频交流励磁双馈风力发电系统并网控制技术研究[D], 湖北武汉: 华中科技大学, 2009.
6. 乔明, 林飞, 孙湖, 等. 基于异步电机的风力机模拟实验平台的研究[J], 电气传动, 2009, 39(1): 40-43.
7. 郭晓明. 电网异常条件下双馈异步风力发电机的直接功率控制[D], 浙江杭州: 浙江大学, 2008.
8. Li Hui, Steurer M. SHIKL. Development of a Unified Design Test and Research Platform for Wind Energy Systems based on Hardware-in-the-loop Real-time Simulation[J], IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1144-1151.
9. 陈彬, 宋平岗, 何鑫. 基于直接转矩控制的风力机模拟器研究[J], 防爆电机, 2007, 42(4): 18-21.
10. 秦涛. 双馈风力发电机组并网控制技术研究[D], 北京: 华北电力大学, 2009.
11. 罗忠玉. 变速恒频双馈风力发电机交流励磁控制研究[D], 黑龙江哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
12. Grauers A. Design of Direct-Drive Permanent-Magnet Generators for Wind Turbines[D], Goteborg: Chalmers University of Technology, 1996, ISBN 91-7197-373-7.
13. 杨淑英. 双馈型风力发电变流器及其控制[D]., 安徽合肥: 合肥工业大学, 2007.
14. 徐飞东. 变速恒频双馈风力发电系统直接功率控制技术研究[D], 湖北武汉: 华中科技大学, 2009.
15. 曾志勇, 王清灵, 冯倩. 基于电压矢量闭环双馈风力发电空载并网策略[J]., 电气传

- 动, 2010, 40(6) :3-7.
16. 罗伟伟. 双馈风力发电机的直接功率控制技术研究[D], 安徽淮南: 安徽理工大学, 2009.
17. 张豪, 邵国庆, 邵松. 基于 MPPT 的变速恒频双馈风力发电系统控制策略[J], 变频器世界, 2011, 10:3-7.
18. H. H. Song, Y. B. Qu. Energy-based Modelling and Control of Wind Energy Conversion System with DFIG[J]. International Journal of Control, 2011, 84(2): 281-292.
19. Lie Xu, and Phillip Cartwright. Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 750-758.
20. Jihen Arbi, Manel Jebali-Ben Ghorbal, Ilhem Slama-Belkhodja, and Lotfi Charaabi. Direct Virtual Torque Control for Doubly Fed Induction Generator Grid Connection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4163-4173.
21. 罗敏. 基于 DSP 的感应电动机直接转矩控制的研究[D], 黑龙江哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
22. 张子才, 黄良沛, 龚争理, 等. 三相异步电机切换过程的动态分析与系统仿真[J], 电气传动, 2010, 40(12) :21-25.
23. 张伟. 基于 DSP 的直接转矩控制系统的研究[D], 黑龙江哈尔滨: 东北农业大学, 2008.
24. 王珺. 双馈型风力发电机励磁控制策略的研究[D], 北京: 北京交通大学, 2009.
25. 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 基于自适应谐振调节器的变速恒频风力发电双馈驱动研究[J], 中国电机工程学报, 2007, 27(14) :96-101.
26. 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M], 北京: 机械工业出版社, 2006:156-157.
27. 曾志勇, 冯婧, 周宏范. 基于功率给定的双馈风力发电最大风能捕获策略[J], 电力自动化设备, 2010, 30(6) :25-30.
28. 程启明, 程尹曼, 汪明媚, 等. 风力发电系统中最大功率点跟踪方法的综述[J], 华东电力, 2010, 38(9):1393-1398.
29. Choon Yik Tang, Yi Guo, and John N. Jiang. Nonlinear Dual-Mode Control of Variable-Speed Wind Turbines With Doubly Fed Induction Generators[J], IEEE Transactions on Control System Technology, 2011, 14(4): 744-749.