

华北电力大学

学术硕士学位论文

基于 FPGA 的永磁直驱风电机组建模研究

Research on Modeling of Permanent Magnet
Synchronous Machine Based on FPGA

史一博

2023 年 5 月

国内图书分类号：TM743
国际图书分类号：621.3

学校代码：10079
密级：公开

学术硕士学位论文

基于 FPGA 的永磁直驱风电机组建模研究

硕士研究生：史一博

导师：刘崇茹教授

申请学位：工学硕士

学科：电气工程

专业：电气工程

所在学院：电气与电子工程学院

答辩日期：2023 年 5 月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM743

U.D.C: 621.3

Dissertation for the Academic Master's Degree

**Research on Modeling of Permanent Magnet
Synchronous Machine Based on FPGA**

Candidate:	Shi Yibo
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Subject:	Electrical Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
School:	School of Electrical & Electronic Engineering
Date of Defence:	May, 2023
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

随着双碳目标的提出, 新能源风力发电进入快速的发展建设阶段。对发电机进行仿真建模是研究风力发电的必要手段, 然而目前硬件平台的永磁直驱风机模型不够完整, 不方便硬件调试。此外现场可编辑逻辑门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 具有硬件并行化和高度流水线工作的特点, 在电磁暂态仿真时优势很大。因此本文以 FPGA 为基础, 研究了如何在 FPGA 平台下搭建永磁直驱风力发电机的精细化电磁暂态模型, 论文的主要工作如下:

(1)在 FPGA 环境下搭建了永磁直驱发电机的数学模型, FPGA 的顶层设计下分别为电路系统和控制系统, 二者成系统级并行。电路系统包括风力机、永磁同步发电机、换流器、LC 电路、电网等模块, 根据模块之间的相互串并行关系组成三级并行计算逻辑, 分别用于计算子系统输入、计算诺顿等效参数、计算节点电压并更新电路。控制系统包括换流器机侧及网侧控制, 与电路系统成解耦并行计算。

(2)提出了一种基于虚拟阻抗补偿的永磁同步发电机恒导纳建模方法, 该方法基于传统发电机模型, 通过在转子上补偿虚拟阻抗的方式使发电机导纳矩阵恒定。补偿虚拟阻抗令发电机模型阶数上升, 相当于添加了一个阻尼绕组。通过该方法消除发电机部分导纳矩阵的时变量, 令完整模型的十四阶导纳矩阵恒定。避免了仿真计算时每个步长高阶矩阵求逆问题, 只需要在仿真开始之前进行预处理, 步长计算时直接调用即可, 可以极大减少板卡资源占用量, 减少步长仿真时间。

(3)在(2)提出的恒导纳模型和(1)搭建的 PMSG 模型的基础上, 以恒导纳发电机模型替换常规的 PD 模型, 使完整永磁直驱发电机导纳矩阵恒定, 避免了 FPGA 高阶矩阵求逆的困难, 只需要在仿真开始前预处理即可, 能节省大量的仿真资源。

通过对单机接负载模型的仿真结果对照分析, 证明了所提出的发电机虚拟阻抗补偿模型在保持导纳矩阵恒定的基础上还兼顾了较高的仿真精度。通过对完整永磁直驱发电机的仿真结果对照分析, 验证了 FPGA 平台下的完整永磁直驱发电机恒导纳模型的仿真精度, 可用于 PMSG 电磁暂态仿真。

关键词: 永磁直驱发电机; 电磁暂态仿真; 恒导纳模型; FPGA;

Abstract

With the proposal of the dual carbon goal, new energy wind power generation has entered a rapid development and construction stage. Simulating and modeling generators is a necessary means of studying wind power generation. However, current simulation tools for permanent magnet synchronous wind turbines often have issues such as incomplete models and inconvenient hardware debugging. In addition, Field Programmable Gate Array (FPGA) has the characteristics of hardware parallelism and highly pipelined operation, which has great advantages in electromagnetic transient simulation. Therefore, this article is based on FPGA and studies how to build a complete electromagnetic transient model of permanent magnet direct drive wind turbines on the FPGA platform. The main work of the paper is as follows:

(1) A mathematical model of a permanent magnet direct drive generator was built in an FPGA environment. The top-level design of the FPGA consists of a circuit system and a control system, both of which are system level parallel. The circuit system includes modules such as wind turbines, permanent magnet synchronous generators, inverters, LC circuits, and power grids. Based on the serial parallel relationship between the modules, a three-level parallel computing logic is formed, which is used to calculate subsystem inputs, calculate Norton equivalent parameters, calculate node voltages, and update the circuit. The control system includes inverter machine side and grid side control, which are decoupled and parallel calculated with the circuit system.

(2) A permanent magnet synchronous generator constant admittance modeling method based on virtual impedance compensation is proposed. This method is based on traditional generator models and fixes the generator admittance matrix by compensating virtual impedance on the rotor. By eliminating the time variable of the generator partial admittance matrix, the 14th order admittance matrix of the complete model is fixed. Avoiding the inverse problem of high-order matrices for each step during simulation calculation, only preprocessing is required before the simulation starts, and the step calculation can be directly called, which can greatly reduce the board resource usage and reduce the step simulation time.

(3) On the basis of the constant admittance model proposed in (2) and the PMSG model constructed in (1), the conventional PD model is replaced by the constant admittance generator model, so that the admittance matrix of the complete permanent magnet direct drive generator is constant, avoiding the difficulty of finding the inverse of the FPGA high-order matrix. Only preprocessing is needed before the simulation starts, which can save a lot of simulation resources.

By comparing and analyzing the simulation results of a single machine connected load model, it is proven that the proposed generator virtual impedance compensation model maintains a constant admittance matrix while also taking into account high simulation accuracy. By comparing and analyzing the simulation results of a complete permanent magnet direct drive generator, the simulation accuracy of the constant admittance model of the complete permanent magnet direct drive generator on the FPGA platform was verified, which can be used for PMSG electromagnetic transient simulation.

Keywords: Permanent magnet synchronous machine; Electromagnetic transient simulation; Fixed-admittance modeling; FPGA;

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 课题研究现状.....	2
1.2.1 发电机仿真建模.....	2
1.2.2 电磁暂态仿真.....	3
1.3 FPGA 的仿真平台	4
1.3.1 FPGA 并行性分析	4
1.3.2 FPGA 流水线技术	5
1.3.3 FPGA 开发方式	7
1.4 本文主要工作.....	8
第 2 章 基于 FPGA 的 PMSG 仿真建模	10
2.1 风力机部分.....	11
2.1.1 风力机重要参数.....	11
2.1.2 风力机功率控制.....	12
2.1.3 FPGA 仿真实现	14
2.2 发电机部分.....	15
2.2.1 电磁耦合部分.....	16
2.2.2 机械力矩部分.....	18
2.2.3 FPGA 仿真实现	20
2.3 换流器部分.....	21
2.3.1 开关建模及 FPGA 实现	22
2.3.2 控制建模及 FPGA 实现	24
2.4 其他模块.....	26
2.4.1 无源元件建模及 FPGA 实现	26
2.4.2 无穷大电源建模及 FPGA 实现	28
2.5 PMSG 系统建模.....	29
2.5.1 顶层设计.....	29
2.5.2 电路系统.....	30
2.5.3 控制系统.....	34
2.6 本章小结.....	36
第 3 章 发电机恒导纳模型	37
3.1 整理发电机模型.....	37
3.2 整理阻抗矩阵.....	39
3.2.1 整理三重矩阵乘积项.....	40

3.2.2 计算矩阵对角线项.....	41
3.2.3 计算矩阵非对角线项.....	43
3.3 虚拟阻抗补偿.....	44
3.4 补偿阻抗的影响.....	46
3.5 本章小结.....	48
第 4 章 算例仿真与验证	49
4.1 系统参数配置.....	49
4.2 发电机单机仿真结果.....	51
4.2.1 静态稳定仿真.....	51
4.2.2 暂态稳定仿真.....	52
4.3 完整发电机仿真结果.....	54
4.3.1 换流器控制仿真.....	54
4.3.2 静态稳定仿真.....	56
4.3.3 暂态稳定仿真.....	58
4.4 本章小结.....	60
第 5 章 总结与展望	62
5.1 总结.....	62
5.2 展望.....	63
参考文献.....	64

第1章 绪 论

1.1 课题研究背景

进入 21 世纪，全球气候变化加剧，夏冬极端天气次数比较往年逐渐增多；伴随社会发展，居民人口及消费水平逐渐呈上升趋势；同时以煤、石油为代表的传统化石能源日渐枯竭。在这种情况下，加快发展可再生能源，实施可再生能源替代行动，构建清洁低碳、安全高效能源体系的是保障人民幸福、社会发展、国家安全的必经之路。

2021 年召开的中华人民共和国第十三届全国人民代表大会第四次会议和中国人民政治协商会议第十三届全国委员会第四次会议，明确提出了“碳达峰”、“碳中和”的双碳目标^[1]，即：我国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。这个目标进一步指明了我国能源转型变革的战略方向，为我国可再生能源发展设定了新的航标。2021 年 3 月 1 日，国家电网公司发布了“碳达峰、碳中和”行动方案，方案强调国家电网公司将以碳达峰为基础，碳中和为目标，加快推进能源供给和能源消费低碳化高效化^[2]。2021 年 3 月 15 日，中共中央总书记习近平主持召开中央财经委员会第九次会议，明确了碳达峰、碳中和工作的基本思路和主要举措，将其纳入生态文明建设整体布局^[3]。

在国家的大力推动下，2022 年，全国可再生能源新增装机 1.52 亿千瓦，占全国新增发电装机的 76.2%，全国可再生能源发电量 2.7 万亿千瓦时，占全国发电量的 31.3%、占全国新增发电量的 81%；可再生能源已成为我国电力新增装机和新增发电量的主体^[4]，可再生能源进入快速发展建设阶段^[5-7]。其中，风力发电由于清洁环保、分布广泛、能源充裕，成为新能源发电的主流。据国家能源局统计，2022 年全国风电新增装机约为 0.37 亿千瓦^[8]，全国累计风电装机容量约 3.7 亿千瓦^[9]；此外，全球风能理事会（Global Wind Energy Council, GWEC）于 2022 年 4 月 4 日发布《2022 年全球风能报告》（Global Wind Report 2022）指出，2021 年全球风电新增装机容量约 0.94 亿千瓦，全球累计风电装机容量约 8.37 亿千瓦^[10]，截止 2022 年全球新增装机量与累计装机量前五国家如图 1-1 所示。

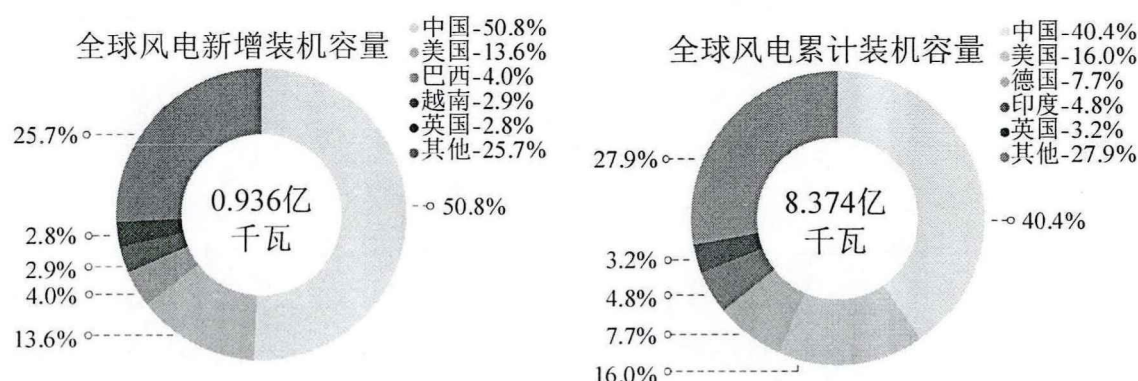


图 1-1 截止 2022 年全球新增装机量与累计装机量前五国家

随着风力发电进入快速建设发展阶段，风力发电的机组容量越来越大，结构越来越复杂，风电场的规模越来越大，风场内机组数量也越来越多。大规模风电并网对电力系统的影响也逐步增大，风力发电的无法预测性和波动性会影响电网的安全稳定运行，因此发电机的仿真研究逐渐成为领域内的热门，受到越来越多专家学者的重视^[11-13]。建立风力发电机组的电磁暂态模型，实现基于硬件的实时仿真，对研究风电并网的影响具有重要意义。

1.2 课题研究现状

1.2.1 发电机仿真建模

风力发电机由于定转子系统耦合关系复杂，并且除了电路磁链还涉及到转子力矩的物理部分，因此目前主流的仿真模型仍然是相域(phase domain, PD)模型^[21-22]、dq 模型^[23-25]和电压后电抗(voltage-behind-reactance, VBR)模型^[26]等。

文献[21]提出的 PD 模型是一种常用的发电机模型。PD 模型基于原始的电压磁链耦合公式^[27]，在 abc 坐标上表示出三相的电压电流关系，参数以物理变量和相位坐标表示^[28]。该方法的优点是发电机模型可以直接接入电网进行计算，网络求解和计算较为方便，缺点是发电机的内部方程参数会随着转子角的变化而变化，发电机的导纳矩阵时变，网络求解时计算量较大。

dq 模型是通过派克变换将 PD 模型转换为同步速旋转坐标系 dq 下得到的发电机模型，派克变换将基于三相 abc 绕组的电路关系转换为基于 dq 绕组电路关系，将在固定坐标系时变的三相参数转化为旋转坐标系下时不变的参数。该方法的优点是相比 PD 模型，会大大简化发电机内部参数的计算，缺点是定子转子侧电路参数经过了派克变化的转化，无法直接接入电网进行计算，与电网存在转换接口问题。该模型广泛应用于电磁暂态程序如 PSCAD^[29]和 Simulink^[30]中。

此外文献[26]提出的 VBR 模型也是一种常用的发电机模型。VBR 最早由 S.

D. Pekarek 等人提出,其核心思路是基于 PD 模型表示出电机出口端电压电流关系进行简化计算,其本质仍然是类似 PD 模型的三相坐标系仿真,与 PD 模型没有本质区别。

目前工程上一个永磁直驱风电场往往包含几十台风力发电机,单台发电机组包含发电机和换流器等设备,结构复杂,节点数多。在进行电磁暂态实时仿真时,如果采用 PD 模型、VBR 模型等传统变导纳矩阵建模方法,会导致导纳矩阵求逆计算过于困难,消耗大量计算资源且系统仿真规模严重受限,难以进行大规模新能源电力系统电磁暂态仿真。因此有必要考虑模型的恒导纳方法,将网络导纳矩阵恒定进行简化计算。

1.2.2 电磁暂态仿真

风力发电机的硬件仿真对运算能力和实时性都要求较高,随着仿真技术的不断发展,目前市面上已经有几款主流电磁暂态仿真程序,主要包括:

EMTP (Electro-Magnetic Transient Program) 算法^[14-16],该算法的原型是 H. W. Dommel 教授在 1968 年于班那维尔电力局工作时编制完成的,最早约有 5000 条代码语句。随着后续科研工作者的不断深入研究,又逐渐发展成多个版本并得到了广泛的应用,是目前世界上应用最广泛的暂态算法。

PSCAD/EMTDC (Power Systems Computer Aided Design) 软件^[17],PSCAD 为软件的仿真图形界面,EMTDC 为软件的仿真计算核心,该软件的原型是加拿大 Dennis Woodford 博士在 20 世纪 80 年代开发完成的,随后程序被不断开发完善,目前已经成为世界上广泛使用的电磁暂态仿真软件。

除此之外,还有加拿大 Colombia 大学开发 Micro Tran 软件;德国 SIEMENS 公司开发的 NETOMAC 软件^[18];美国 Berkeley 大学开发的 SPICE 算法^[19];美国版那维尔电力局开发的潮流和暂态稳定程序 BPA,中国电科院的电力系统研究所在 20 世纪 80 年代将 BPA 程序引进我国,消化吸收后将其集成到 PSD 软件中潮流和稳态计算的部分;以及 Mathwork 公司开发的 MATLAB 中的 Power System Blockset 工具箱^[20]等等。

目前电力系统的电磁暂态硬件仿真主要是基于中央处理器 (Central Processing Unit, CPU)、图形处理器 (Graphics Processing Unit, GPU)、现场可编程逻辑门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 等具备高算力硬件处理器实现的。较为常用的商业化硬件仿真器有:RTDS、HYPERSIM、RT-LAB 等^[31]。

RTDS^[32]是目前世界范围内使用最为广泛的硬件实时仿真系统,由加拿大曼尼托巴直流研究中心基于 DSP 开发而成。RTDS 具有较高的计算性能,能满足一

定规模的电磁暂态实时仿真需求，仿真规模取决于基本单元 Rack 的数量；但是其扩展性不足，不具备可持续性^[33-34]，难以在其基础上进行更深入的研究。

HYPERSIM^[35]是由加拿大魁北克 TEQSIM 公司开发而成的实时仿真装置。该装置可采用并行存储器，使得多台超级计算机实现并行计算，最高可支持 512 个微处理器配置。目前 HYPERSIM 主要用于超大型电力系统的仿真测试，其主要的缺点就是成本高昂。

RT-LAB^[36]是加拿大 Opal-RT 公司研发的半实物实时仿真平台。支持与上位机 MATLAB/Simulink 通讯，可以在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真系统的数学模型并进行联合建模。RT-LAB 仿真平台的缺点是板卡扩容难度大，且系统无法满足用户自定义需求^[37]。

除此之外还有 eMEGAsim^[38]、NETOMAC^[39]、dSPACE^[40]、ADPSS^[41]等，也属于实时仿真平台的范畴。现行的实时仿真平台有的价格昂贵，使用不便，有的性能强大，却自定义困难，难以开展拓展研究。总的来说目前的实时仿真平台仍然有较多的缺点，无法满足定制化的风力发电机实时仿真需求。

1.3 FPGA 的仿真平台

现场可编程门阵列 FPGA 能够通过编程改变内部结构，相比常规的专用集成电路（Application Specific Integrated Circuit, ASIC）和其他能够编程的逻辑器件拥有更高的灵活性^[42]。并且 FPGA 的硬件结构具有深度流水线并行的特点，能够通过并行实现高精度下的快速运算。相比 CPU、GPU 等基于串行底层逻辑实现的“伪并行”效果，FPGA 的真实并行计算效率更高速度更快。深度流水线并行意味着 FPGA 可以被划分和配置成大量的并行处理单元，这些并行处理单元可以互不干扰同时处理巨量数据。可重构和高度并行化的特点让 FPGA 在电磁暂态仿真领域具有较大优势，被广泛应用于实时仿真领域^[43-44]。

1.3.1 FPGA 并行性分析

FPGA 相比于其他如 CPU、GPU 等硬件处理器，最大的优势即为其基于硬件底层逻辑的大规模并行结构^[45-46]。在网络计算时 FPGA 内部参数皆采用 IEEE 754 标准 32 位浮点数。图 1-2 和图 1-3 为比较并行运算和串行计算过程中数据处理差异性的流程图。图中演示的运算为式(1-1)。其中每个参数皆由独立的寄存器 Reg a、Reg b、Reg c、Reg d、Reg S 进行存储，在最大程度上保持了程序的并行性。

$$S = a \times b + c \times d \quad (1-1)$$

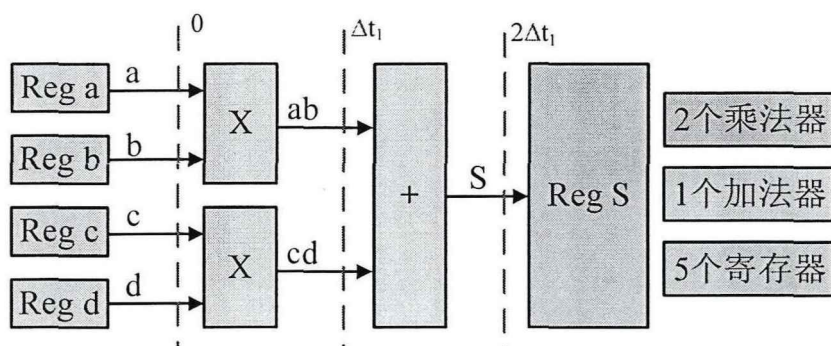


图 1-2 并行计算流程图

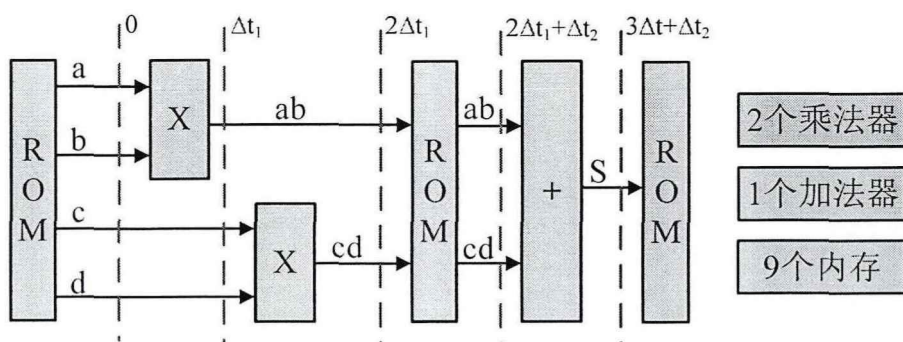


图 1-3 串行计算流程图

由图 1-2 和 1-3 可知，在串行运算中无法同时进行两组乘法运算，需要等 ab 计算完后再进行 cd 的运算。而 FPGA 的算力分布在整块芯片上，因此可以同时同时进行两个乘法器的运算。计算规模越大，运算符越多，程序越复杂，FPGA 的并行计算节省的仿真时间就越多。本质上这是一个“资源”换“时间”的过程。

此外，由于在常规处理器中，参数的存储和读取都是在内存进行的，计算开始时 $abcd$ 四个参数需要依次从内存中读取，中间结果 ab 、 cd 和最终结果 S 也都要到内存中读取和写入，计算速度受到内存读取速度的限制。并且在常规处理器中，内存一般是集总形式的，内存和总线存在共享的限制，数据的读取和写入无法同时进行， $abcd$ 四个参数无法同时读取；相比 FPGA 中，只要将并行的数据存储于不同的寄存器，即可同时读取或写入大量并行数据。

虽然 CPU 的处理频率一般为几 GHz，比 FPGA 的处理频率（一般为几十 MHz）高 1-2 个数量级，但是有内存处理速度和内存总线共享的限制，在进行大电网电磁暂态仿真的时候 CPU 相比 FPGA 在运算速度方面仍然存在很大的劣势。

1.3.2 FPGA 流水线技术

FPGA 深度流水线技术是对并行性的补充，在一定程度上综合了并行运算和串行运算的优点，可以有效提高系统的利用率。流水线技术的底层逻辑是将规模

较大, 层次较多的大型运算模块进行分解, 将子模块计算步骤中间插入寄存器进行数据的中转储存。这样可以使每个计算步骤同时进行不同子模块的计算, 无需等待整个模块运行结束在进行下一步^[47]。这样各级子模块计算同时进行, 相比串行计算大大提高了系统的运行速度, 相比并行计算大大提高了系统的运行效率。并行计算、串行计算、流水线计算逻辑如图 1-4 所示。

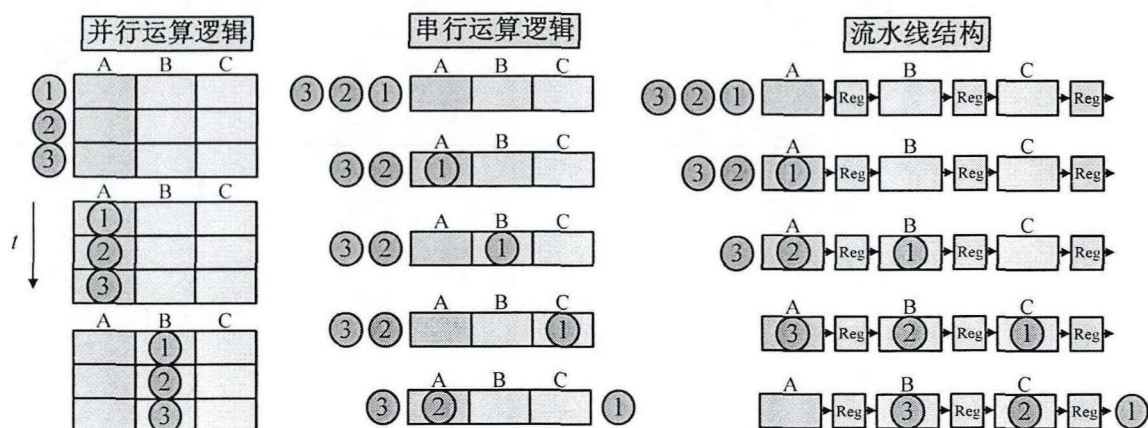


图 1-4 并行、串行、流水线计算逻辑

图 1-4 的左边部分表示程序并行计算逻辑, 中间部分表示串行计算逻辑, 右边部分表示流水线结构下的计算逻辑。“A”、“B”、“C” 分别代表了运算的三个不同运行阶段, “1”、“2”、“3” 分别代表了需要执行运算的三个输入数据。假设执行“A”、“B”、“C” 三个运行阶段所需要的时间都是 t_1 , 三个运行阶段所消耗的计算 IP 核都为 n 个。则在并行运算逻辑下, “A”、“B”、“C” 三个运行阶段各需要消耗 $3n$ 个计算 IP 核, 一共需要 $9n$ 个计算 IP 核, 完成所有数据的处理需要 $3t_1$ 的时间。同理, 在串行运算模式下“A”、“B”、“C” 三个运行阶段一共需要 $3n$ 个计算 IP 核, 完成所有数据的处理需要 $9t_1$ 的时间。串行处理需要如此长的时间, 原因是在计算过程中, 只有当数据“1”处理完成并输出后, 数据“2”才可以开始处理, 否则数据“2”会将数据“1”的结果覆盖。

在流水线计算逻辑下, 如图所示, 在“A”、“B”、“C”后都加入了寄存器。在处理数据“1”的时候, 数据“2”、“3”的处理也可以同时开始, 寄存器的存在避免了数据结果被覆盖。并且寄存器的读取写入延迟一般都较短, 在整体的逻辑运行中可以忽略。因此“A”、“B”、“C” 三个运行阶段一共需要 $3n$ 个计算 IP 核, 完成所有数据的处理需要 $3t_1$ 的时间。

由分析可知, 在 FPGA 上采用流水线计算逻辑, 同时集中了串行计算和并行计算的优点, 一方面节省板卡的运算资源, 另一方面节约程序的运算时间。

1.3.3 FPGA 开发方式

一般而言, FPGA 的开发过程需要经过提出需求、逻辑设计、编程实现、逻辑综合、布局布线、烧录运行等过程^[48]; 本次工程仿真使用的是 Xilinx Virtex-7 FPGA VC707 开发板, 采用 Xilinx 公司的芯片时逻辑综合、布局布线、生成 bit 文件、烧录运行三个步骤都需要通过 vivado 平台实现。目前 Xilinx 公司出品的板卡, 逻辑设计主要有三种不同的实现方式: 用硬件描述语言 Verilog HDL、VHDL 代码直接开发、用赛灵思系统生成器 (Xilinx System Generator, XSG) 结合 Simulink 开发、用高层次综合 (High-level Synthesis, HLS) 进行电路逻辑转写。

直接采用硬件描述语言 Verilog HDL、VHDL 进行代码开发是应用最广泛, 也是对基本功要求最高的方式。它需要代码编写者有非常强的逻辑思维能力, 能够用最简单的四则运算来表示出整个模型的数学关系。同时它也需要代码编写者有非常清晰的时序判断能力, FPGA 有着非常严密的时钟周期系统, 时序逻辑错误可能导致系统下游的计算 IP 核接收到了上游 IP 核的虚假输出数据, 导致后续所有计算数据错误。采用硬件描述语言进行开发可以对 FPGA 板卡的电路进行任何的细节调整, 在开发人员代码优化能力足够强的情况下, 相比用 XSG、HLS 等开发工具, 直接编写的代码冗余最低, 系统效率最高。

XSG 是 Xilinx 公司官方研发的一种数字信号处理开发工具, 本质上它是将 Xilinx FPGA 开发中常用的 IP 核打包, 并嵌入 MATLAB、Simulink 软件中, 利用 Simulink 的可视化编程界面进行开发的方式。XSG 基本模块库简要说明如表 1-1 所列。对于开发人员而言, 编程实现步骤被简化为了拖拽模块、设定时序、连接模块^[49], 随后开发人员需要确定数据位宽, 确定时序, 检查数据溢出。然后 XSG 会自动将整个程序打包, 输出一个网表工程文件, 开发人员在 vivado 平台上对其进行逻辑综合、布局布线、生成 bit 文件, 烧录进 FPGA 即可运行。

第三种常见的 FPGA 开发方式为高层次综合工具 HLS, 它的作用是可以将高层次语言的依照逻辑结构自动转换为低层次抽象语言表示的电路。高层次语言一般包括 C、C++ 等高级程序设计语言, 是目前计算机系统设计和应用程序编写的主要语言, 往往不具有时钟和时序的概念。相对应的低层次语言一般包括 Verilog HDL, VHDL 等硬件描述语言, 可直接用代码描述包含时钟时序概念的逻辑电路图、电子数字系统。高级程序设计语言易于学习、逻辑简单、开发容易, 但是无法直接用于描述程序底层电路; 抽象语言门槛较高、逻辑复杂、开发困难, 但是直接表示了程序底层电路的布线、信号传递、时序逻辑。HLS 工具打通了这两种语言之间的隔阂, 可以直接将 C 语言转换为同样逻辑的 Verilog HDL 语言,

打包成 IP 核供顶层模块调用。该方法可以大大减少程序的开发时间和工作量，减少程序开发难度，但是使用 HLS 转化会造成程序冗余和板卡资源浪费，后续需要有针对性的机型算法优化^[50-51]。

表 1-1 XSG 基本模块库简要说明

XSG基本模块库名称	简要说明
Index	包含了所有Xilinx模块
Basic Elements	包含了数字逻辑的标准组件模块
Communication	包含了数字通信系统的通用模块
Control Logic	包含了用于创建控制逻辑以及状态机逻辑的模块
Data Type	包含了用于数据类型转换的模块
DSP	包含了用于数字信号处理的模块
Math	包含了用于完成数学运算的模块
Memory	包含了存储器操作模块
Shared Memory	包含了共享存储器操作模块
Tools	包含了使用函数模块，如代码生成、资源评估、协同仿真等

1.4 本文主要工作

本文围绕 FPGA 平台下的永磁直驱风力发电机电磁暂态仿真展开研究，一方面建立了 FPGA 平台下的永磁直驱发电机电磁暂态计算模型，另一方面针对模型导纳矩阵时变的问题，提出了一种基于虚拟阻抗补偿的永磁同步发电机恒导纳建模方法。论文的主要工作如下：

第二章在 FPGA 环境下搭建了永磁直驱发电机的数学模型。FPGA 的顶层设计下分别为电路系统和控制系统，二者成系统级并行。电路系统包括风力机、永磁同步发电机、换流器、LC 电路、电网等模块，根据模块之间的相互串并行关系组成三级并行计算逻辑，分别用于计算子系统输入、计算诺顿等效参数、计算节点电压并更新电路。控制系统包括换流器机侧及网侧控制，与电路系统成解耦并行计算。整理出了完整永磁直驱发电机的十四阶节点导纳矩阵，发现完整模型的节点导纳矩阵时变，每个步长需要进行十四阶的矩阵求逆，严重拖累了仿真速度，浪费了大量仿真资源。

第三章提出了一种基于虚拟阻抗补偿的永磁同步发电机恒导纳建模方法。通过对导纳矩阵的分析，发现完整导纳矩阵时变的原因是发电机部分的导纳矩阵存在与转子位置角有关的量。通过对永磁同步发电机 PD 模型的阻抗矩阵整理，发

现内部阻抗矩阵时变的原因是 dq 轴的等效阻抗不相等。于是考虑在计算时补偿虚拟阻抗，以消除导纳矩阵的时变量，达到恒导纳的效果。补偿虚拟阻抗后，PMSG 仿真的导纳矩阵恒定，不需要每个步长进行一次矩阵求逆，只需要在提前预处理即可。补偿虚拟阻抗相当于增加了一个阻尼绕组，发电机模型阶数上升。通过能量角度和特征根计算的分析，可证明添加的虚拟阻抗对模型的影响极小。

第四章依次进行了发电机单机接负载和完整发电机模型的仿真，针对模型的稳态、小扰动、对称故障和不对称故障都进行了测试。对单机接负载的模型仿真证明了第三章所提出的基于虚拟阻抗补偿的永磁同步发电机恒导纳建模方法的正确性。对完整发电机模型的仿真证明了所搭建的 FPGA 下的永磁直驱发电机模型的正确性。

第五章对本文所作的工作进行了总结，并对永磁直驱风机，以及永磁直驱风场的 FPGA 建模后续发展进行了展望。

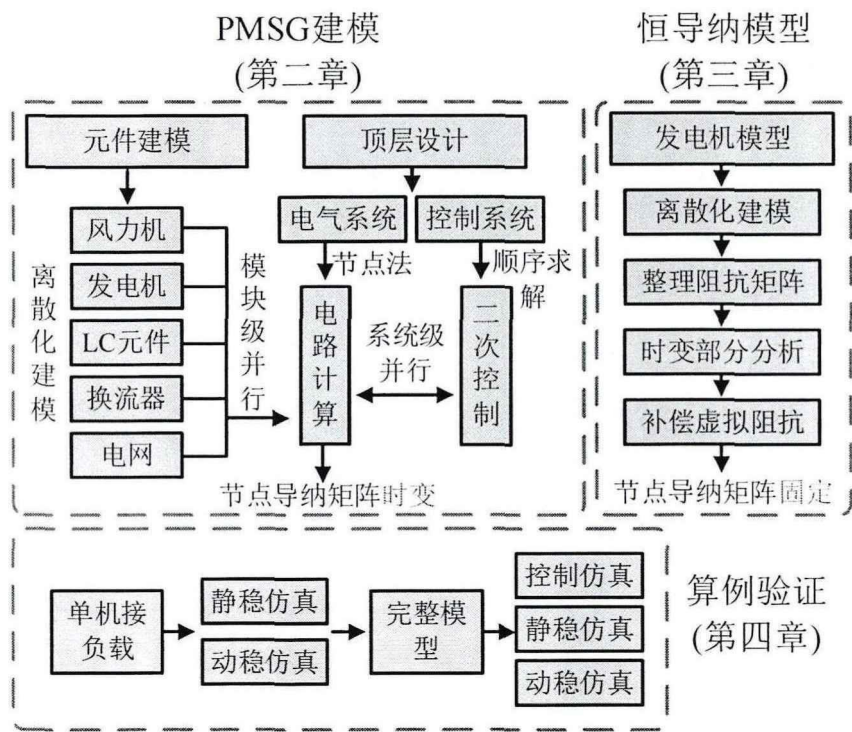


图 1-5 本文主要工作

第2章 基于 FPGA 的 PMSG 仿真建模

目前风力发电工程中常用的风力发电机主要有双馈异步风力发电机(Doubly fed Induction Generator, DFIG)和直驱永磁风力发电机(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)两种^[52]。相比双馈异步风机,永磁直驱风机由于没有齿轮箱,且经过全功率变流器连接至电网,因此具有成本低、效率高、功率因数高、噪声小、结构可靠等优点,相比双馈异步风力发电机有更好的发展前景,逐渐成为目前风力发电工程装机的主流选择。

完整的永磁直驱风力发电机由多个部件组成。分别为:风力机、发电机、机侧全功率变流器及换流器控制、网侧全功率变流器及控制等部分。在仿真系统建模中可以将其简单区分为一次电气系统和二次控制系统,两部分互相影响,在仿真中分别并行运算,如图 2-1 所示。

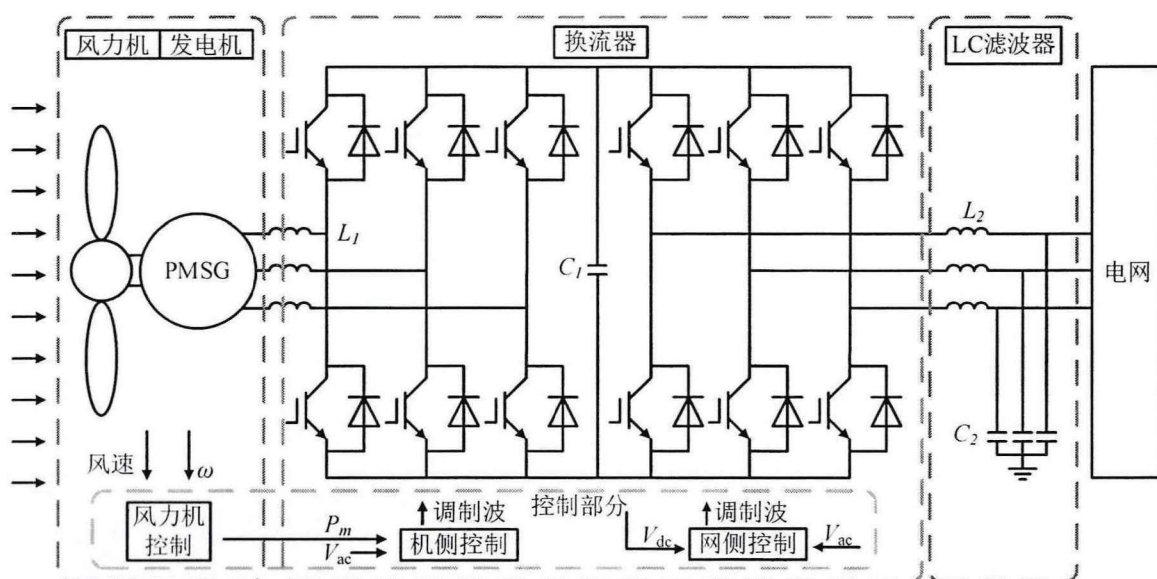


图 2-1 永磁直驱风机结构

想对永磁直驱风机的电气一次系统进行完整的建模,需要首先进行各个模块的分散建模。可以将风机分解为风力机模块、发电机模块、换流器模块以及电网模块,除此之外还有一些基础的无源元件如 LC 等。本章节的主要内容即为各个模块的 FPGA 小步长仿真建模,以及模块互相之间的信息逻辑交互。

2.1 风力机部分

2.1.1 风力机重要参数

风力机及控制系统建模时，涉及到的重要参数主要有：叶尖速比、攻角和叶片功率系数三种，接下来开始详细介绍。

叶尖速比（Tip Speed Ratio, TSR）是风力发电系统中的一个重要参数，定义为风轮叶片尖端线速度与风速之比，一般由希腊字母 λ 表示。叶尖速比满足公式^[54]：

$$\lambda = \frac{\omega_M r}{v_w} \quad (2-1)$$

其中 r 为叶片半径（m）， ω_M 为叶片角速度（rad/s）， v_w 为风速（m/s），永磁同步风力发电机没有齿轮箱，因此叶片角速度即为发电机转子角速度。

攻角是控制叶片升力的重要参数，定义为风速方向与叶片弦线之间的夹角，一般由希腊字母 α 表示。风机的控制系统就是通过控制攻角保证风机能在风速波动情况下始终保持额定状态运行的。风力机的攻角示意图如图 2-2 所示。

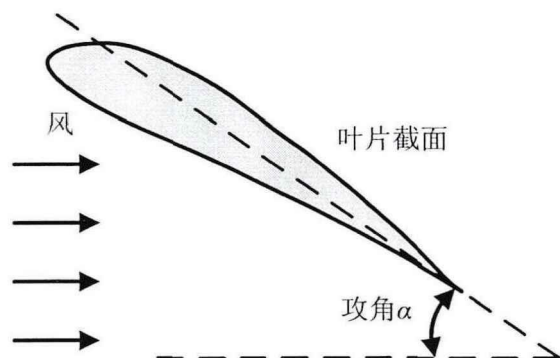


图 2-2 风力机攻角示意图

风力机部分通过叶片捕获风的动能，驱动发电机转子旋转，将风的动能转换为发电机的机械能。在风力机运行过程中，叶片的大小，风的密度，叶片与风的攻角等都影响风力机捕获风能的效率，该效率可用叶片功率系数 C_p 表示。 C_p 也称风能利用系数，为叶片捕获的风能功率与流过叶片范围内气流功率之比，一般在 0.2-0.5 范围内，根据贝兹极限，叶片功率系数 C_p 最大理论值为 0.59^[55]。在变桨距风力发电系统中，叶片功率系数 C_p 是受叶尖速比和攻角影响的非线性函数。具体公式如公式(2-2)所示^[56]，以叶尖速比和攻角为横纵坐标，能画出叶片功率系数 C_p 的三维图，如图 2-3 所示。

$$C_p(\lambda, \alpha) = (0.44 - 0.0167\alpha) \sin\left(\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\alpha}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\alpha \quad (2-2)$$

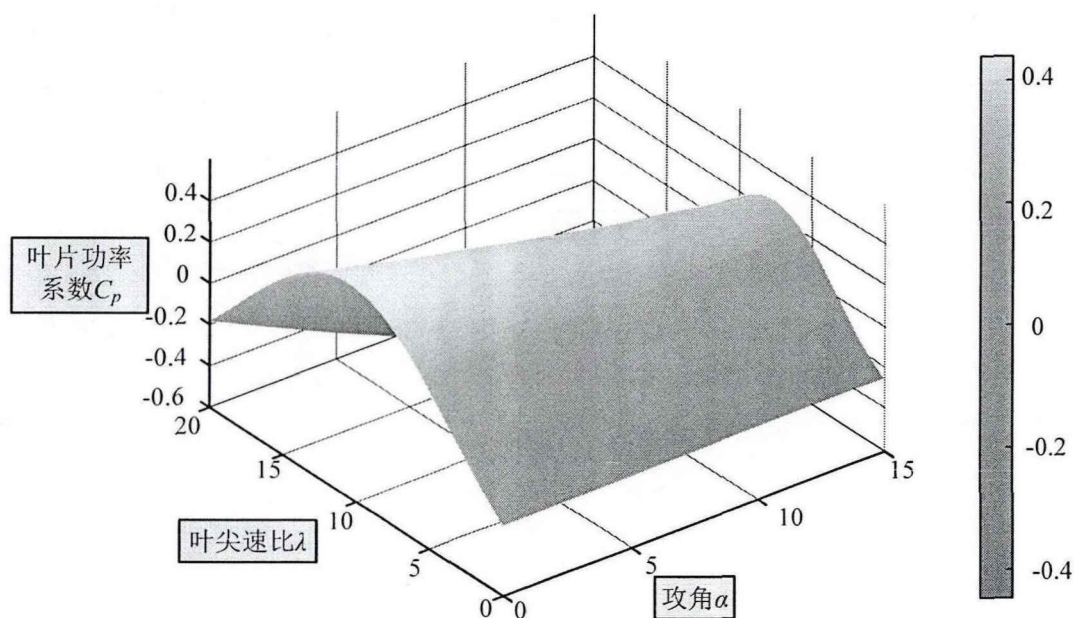


图 2-3 风力机叶片功率系数曲线

2.1.2 风力机功率控制

风力机部分通过叶片将风的动能转换为发电机的机械能。风力发电机叶片捕获的风能功率及转化的机械功率 P_M 公式如下所示^[54]:

$$P_M = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p \quad (2-3)$$

公式中 ρ 为空气密度 (kg/m^3), A 为叶片覆盖的面积 (m^2), v_w 为风速 (m/s)。空气密度 ρ 为空气压力与空气温度的函数, 海平面气温 15°C 时。空气密度 ρ 约为 1.2 kg/m^3 。叶片覆盖的面积 A 可用叶片半径计算, 为已知量。

机械转矩 T_M 与机械功率 P_M 、发电机转速 ω_M 存在固定的数量关系, 用公式 (2-4) 即可计算得到风力机输入永磁同步发电机的机械转矩^[54]。

$$T_M = \frac{P_M}{\omega_M} \quad (2-4)$$

风力机的运行过程中有控制系统的参与, 控制系统保证风机能在风速波动的情况下维持稳定的功率输出, 并且在风速过高的情况下停机, 保证风力机的机械结构不被损坏。实际控制一般由最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 控制阶段、变桨距控制阶段、启停机控制阶段三个部分组成^[54]。

风力机控制下的输出机械功率曲线如图 2-4 所示。

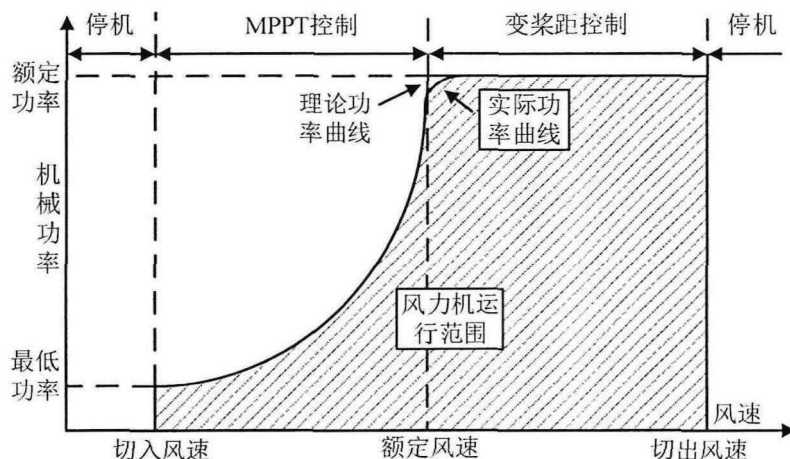


图 2-4 风力机机械功率曲线

当风速小于切入风速时，风力机由于升力不够而停机。当风速大于切入风速，小于额定风速时，风力机处于 MPPT 控制阶段，控制系统保证叶片的攻角始终处于最优攻角 α_R ，以保证在风速小于额定风速的情况下风力机叶片功率系数最大，能够捕获功率最多。此时由公式(2-3)可知，在不考虑风速影响叶片功率系数的情况下，捕获的机械功率与风速成三次方关系。

当风速大于额定风速，小于切出风速时，风力机处于变桨距控制阶段，这个阶段风力机控制可通过调节叶片攻角使得风力机的捕获功率始终维持在额定值。当风速大于切出风速时，若此时风力机仍然迎风旋转，容易导致风力机因损坏而停机。因此风速过高的情况下风力机控制将叶片完全旋转至迎风面，叶片与风之间的相互作用力完全消失，叶片失去升力，风力机彻底停机。

在对风力机进行数学建模时，可以将其分为叶片控制部分和机械物理部分两个子系统。叶片控制部分通过转速、风速等因素计算叶尖速比和攻角，随后计算叶片功率系数；机械物理部分通过叶片功率系数计算风力机输出的机械功率和机械转矩，并将功率传递给发电机子系统。并且由图 2-6 可知，风速小于切入风速、风速大于额定风速，小于切出风速、风速大于切出风速这三种情况下，风力机捕获的机械功率都是固定的，只有当风速大于切入风速，小于额定风速时，风力机的 MPPT 控制介入运行，风力机捕获的机械功率才需要进行计算。风力机机械功率计算逻辑如图 2-5 所示，图中 v_w 为风速， v_{in} 为切入风速， v_R 为额定风速， v_{out} 为切出风速， P_{base} 为机械功率额定值。

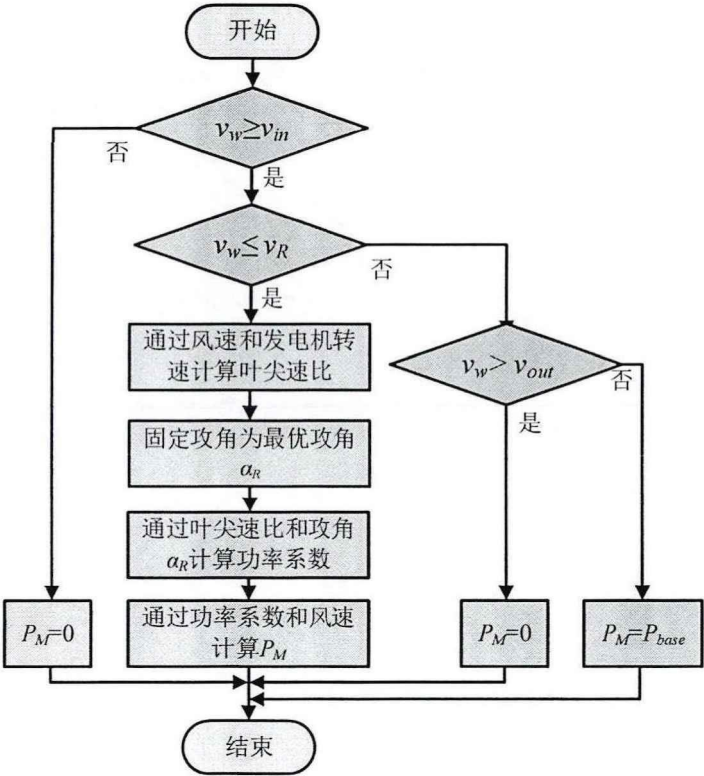


图 2-5 风力机机械功率计算逻辑

2.1.3 FPGA 仿真实现

在进行 FPGA 计算时，首先需要明确风力机模块的模块级输入输出；风力机模块输入每个时刻的风速和发电机的转速，输出每个时刻的机械功率和机械转矩，机械功率和机械转矩输入发电机模块进行下一步计算。

当风速大于切入风速，小于额定风速时，叶片处于 MPPT 控制过程，攻角始终维持为最优攻角 α_R 不变。能画出风力发电机在固定攻角的情况下叶尖速比与功率叶片系数的关系图，如图 2-6 所示。

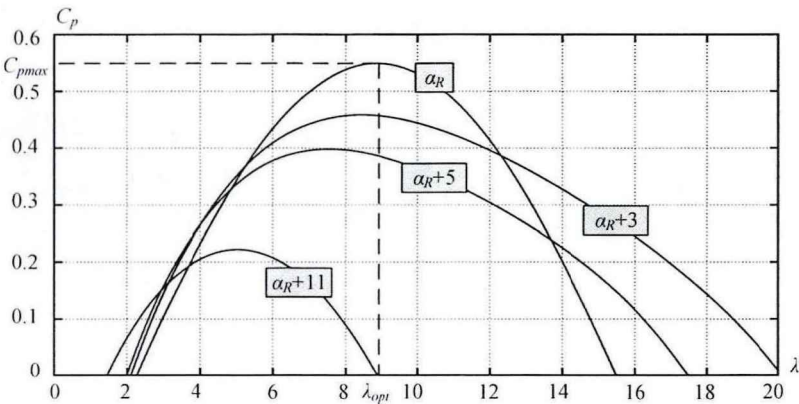


图 2-6 风力机叶尖速比与功率系数的关系

在叶片半径、叶片角速度、风速已知的情况下，可以用公式(2-1)计算出叶尖

速比；已知攻角为最优攻角 α_R ，代入公式(2-2)可计算出当前风速情况下的叶片功率系数，代入公式(2-3)即可计算得到当前风速情况下的风力机捕获的风能功率。永磁同步风机不存在齿轮箱，风力机直接连接发电机，因此风力机捕获的风能功率即为同步发电机接收到的机械功率，代入公式(2-4)即可得到风力机的机械转矩。风力机子系统输入风速和发电机转速，输出机械功率和机械转矩给发电机子系统。在小步长仿真开始前需要进行预处理，计算出 $0.5A\rho$ 的值并存入 ROM 核中，每次步长开始调用即可，该方法可以减少仿真所需的板卡资源。在 FPGA 中整体的实现逻辑如图 2-7 所示。

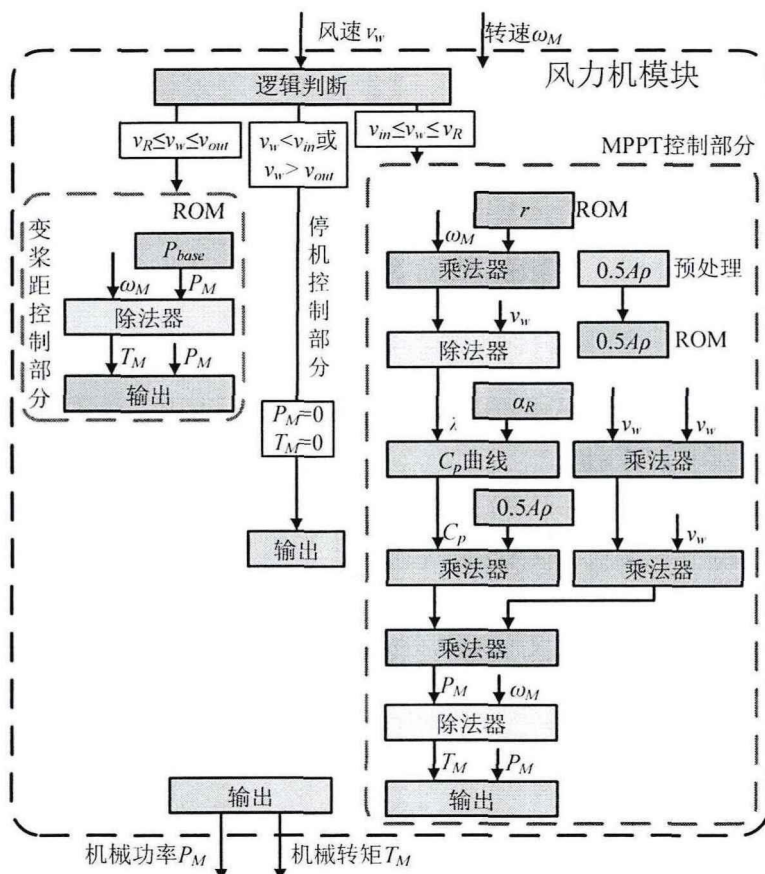


图 2-7 风力机的 FPGA 仿真实现

2.2 发电机部分

发电机模型不但有定转子的电磁耦合关系，还存在转子力矩旋转的物理关系。目前主流的仿真模型仍然是 PD 模型、dq 模型，VBR 模型。该小结主要简单介绍 PD 模型、dq 模型的基本公式以及仿真方法，VBR 模型由于和 PD 模型没有本质区别，因此不再赘述。本文提出了一种改进优化后的永磁同步发电机模型，并将应用于 FPGA 硬件仿真，将于第三章为主要内容做详细介绍。

2.2.1 电磁耦合部分

永磁同步发电机模型与常规同步发电机模型的主要区别是,永磁同步发电机的磁链由永磁体提供,在发电机运行过程中永磁体提供的磁链保持不变;常规同步发电机的转子 d 轴存在一个励磁绕组,用励磁绕组的电流产生发电机旋转所需要的磁链,因此相比永磁同步发电机,在发电机模型里会多一个 d 轴方向上的励磁轴,模型阶数高一阶^[57]。

PD 模型是定子在 abc 三相固定绕组下,转子在 dq 轴旋转绕组下构成的模型,永磁同步发电机的 PD 模型包括定子 abc 三个绕组和转子 DQ 两个绕组,一共五个绕组的电压磁链方程。此外,需要在定子 abc 三相和转子 D 轴磁链方程上补偿永磁体提供的磁链在各个绕组上的投影。永磁同步发电机的 PD 模型电压方程如下^[57]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abc} \\ \mathbf{v}_{DQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s & \\ & \mathbf{r}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{DQ} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abc} \\ \boldsymbol{\lambda}_{DQ} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

其中:

$$\mathbf{r}_s = \text{diag}(r_s \quad r_s \quad r_s), \mathbf{r}_r = \text{diag}(r_D \quad r_Q) \quad (2-6)$$

永磁同步发电机的 PD 模型磁链方程如下:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abc} \\ \boldsymbol{\lambda}_{DQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss(3 \times 3)} & \mathbf{L}_{sr(3 \times 2)} \\ \mathbf{L}_{rs(2 \times 3)} & \mathbf{L}_{rr(2 \times 2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{DQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abcm} \\ \boldsymbol{\lambda}_{DQm} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

其中:

$$\mathbf{L}_{ss(3 \times 3)} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta - 60^\circ) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta + 60^\circ) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta - 60^\circ) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2(\theta - 120^\circ) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta + 180^\circ) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta + 60^\circ) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta + 180^\circ) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

$$L_A = \frac{L_{md} + L_{mq}}{3}, L_B = \frac{L_{md} - L_{mq}}{3}$$

公式中 L_{md} 、 L_{mq} 分别表示发电机的 dq 轴电感。

$$\mathbf{L}_{sr(3 \times 2)} = \begin{bmatrix} L_{md} \sin \theta & L_{mq} \cos \theta \\ L_{md} \sin(\theta - 120^\circ) & L_{mq} \cos(\theta - 120^\circ) \\ L_{md} \sin(\theta + 120^\circ) & L_{mq} \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

$$\mathbf{L}_{rs(2 \times 3)} = \frac{2}{3} [\mathbf{L}_{sr(3 \times 2)}]^T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} L_{md} \sin \theta & L_{md} \sin(\theta - 120^\circ) & L_{md} \sin(\theta + 120^\circ) \\ L_{mq} \cos \theta & L_{mq} \cos(\theta - 120^\circ) & L_{mq} \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

$$\mathbf{L}_{rr(2 \times 2)} = \begin{bmatrix} L_{lD} + L_{md} & 0 \\ 0 & L_{lQ} + L_{mq} \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

$$\lambda_{abcm} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \lambda_m, \lambda_{DQm} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \lambda_m \quad (2-12)$$

dq 模型整体上与 PD 模型差别不大，对 PD 模型 abc 三相坐标系下的方程通过派克变换转换为 dq0 坐标系下的方程，便能够在 dq0 坐标系下分析电机的暂态行为，得到电机的 dq 模型。永磁同步发电机的 dq 模型电压方程如下：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{dq0} \\ \mathbf{v}_{DQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s & \\ & \mathbf{r}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{dq0} \\ \mathbf{i}_{DQ} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_{dq0} \\ \lambda_{DQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

其中：

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} -\lambda_q \omega_r & \lambda_d \omega_r & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2-14)$$

永磁同步发电机的 dq 模型磁链方程如下：

$$\begin{bmatrix} \lambda_{dq0} \\ \lambda_{DQ} \end{bmatrix} = \mathbf{L} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{dq0} \\ \mathbf{i}_{DQ} \end{bmatrix} + \lambda_m \quad (2-15)$$

其中：

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_d & & L_{md} & & \\ & L_q & & L_{mq} & \\ & & L_{ls} & & \\ L_{md} & & & L'_{kd} & \\ & L_{mq} & & & L'_{kq} \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

$$\lambda_m = \begin{bmatrix} \lambda'_m & \lambda'_m \end{bmatrix}^T \quad (2-17)$$

dq 模型参数右上角的'表示归一化之后由转子侧折算到定子侧的量。以上就是永磁同步发电机的 PD 模型和 dq 模型基本方程，在进行离散小步长电磁暂态计算时还需要进行离散化整理，将其整理成 EMTP 型出口端电压电流的形式，才可接入电网中进行仿真。

具体的发电机模型小步长仿真整理过程将在下一章推导恒导纳模型时给出，这里只给出小步长模型推导结果。PD 模型和 dq 模型本质上是统一的，区别只是 dq 模型应用了派克变换，将定子侧参数由三相固定 abc 绕组转换到两相旋转 dq 绕组。因此下面仅给出 PD 模型在小步长仿真中的外部网络结构公式，dq 模型的公式较为相似，不再给出。

永磁同步发电机 PD 模型的外部网络结构公式如下：

$$\mathbf{v}_{abc}(t) = -\mathbf{r}_{eq}(t)\mathbf{i}_{abc}(t) + \mathbf{e}_h(t) \quad (2-18)$$

利用节点电压法计算时，可以将公式(2-18)转换为诺顿等效的形式，公式如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{abc}(t) &= \mathbf{i}_{hgen}(t) - \mathbf{Y}_{eqgen}\mathbf{v}_{abc}(t) \\ \mathbf{Y}_{eqgen}(t) &= [\mathbf{r}_{eq}(t)]^{-1}, \mathbf{i}_{hgen}(t) = \mathbf{Y}_{eqgen}(t)\mathbf{e}_h(t) \end{aligned} \quad (2-19)$$

在 FPGA 仿真过程中，采用诺顿等效的电路需要首先通过上一步长的电压电流计算整个网络的历史电流源，随后用上一步长的参数形成当前步长的网络节点导纳矩阵并求逆，将网络节点导纳矩阵逆矩阵和历史电流源相乘计算当前步长的节点电压。由公式(2-19)可知，网络节点导纳矩阵需要对永磁同步发电机的等效阻抗矩阵求逆，并整合进其他节点的导纳才能形成整个网络的节点导纳矩阵。

由图 2-1 可知，单台永磁直驱风力发电机有 14 个节点，仅仅针对单个完整风机的建模仿真就需要每个步长进行 14 阶的节点导纳矩阵求逆，更何况目前工程上一个永磁直驱风电场往往包含几十台风力发电机。而且 FPGA 平台只能提供简单的四则运算 IP 核，没有能进行矩阵求逆的工具，需要自行开发。仿真中每个步长都需要进行高阶矩阵求逆，编程工作量和资源消耗量对于 FPGA 仿真平台来说太大了，必须要考虑其他方法进行运算化简。

基于此类需求，本文在第三章提出了一种基于虚拟阻抗补偿的永磁同步发电机恒导纳建模方法，通过结合换流器的伴随离散电路(Associated Discrete Circuit, ADC)模型，可建立 PMSG 完整恒导纳模型并进行电磁暂态仿真，避免了每个步长进行节点导纳矩阵求逆的困难，只需要在仿真开始之前进行预处理即可。具体的模型介绍和推导过程会在第三章给出。

2.2.2 机械力矩部分

上一小节，已经通过详细的数学推导得到了永磁同步发电机电路磁路耦合部分的小步长仿真公式，这一小节着重推导永磁同步发电机机械力矩部分的公式。机械力矩部分影响的主要是转子转速。风力机输出机械功率，通过机械转矩驱动转子旋转，转子上的线路切割磁感线产生感应电流，将机械能转换为电能。一般而言，转子运动方程如下所示：

$$\frac{d\omega_M}{dt} = \frac{P}{J}(T_M - T_e - D\omega_M) \quad (2-20)$$

公式中的 P 为极对数，是发电机固定的参数； J 为发电机的转动惯量(kg/m^2)，

用来衡量发电机转子的惯性大小； T_e 为电磁转矩，是代表了发电机机械能转化为电能的物理量； D 为机械阻尼，是发电机转子旋转过程中的摩擦力系数，也代表了发电机运行过程中机械能转换为热能耗散的部分，假定为理想电机表面光滑时可以将该部分置零。

在仿真过程中机械转矩由风力机子系统给出，电磁转矩公式如下^[57]：

$$T_e = \frac{P}{2} \begin{bmatrix} -\mathbf{i}_{abc}^T & \mathbf{i}_{DQ}^T \end{bmatrix} \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss(3 \times 3)} & \mathbf{L}_{sr(3 \times 2)} \\ \mathbf{L}_{rs(2 \times 3)} & \mathbf{L}_{rr(2 \times 2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{DQ} \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

对公式(2-21)进行整理后可得：

$$T_e = \frac{P}{2} \left(\mathbf{i}_{abc}^T \frac{d\mathbf{L}_{ss(3 \times 3)}}{d\theta} \mathbf{i}_{abc} - \mathbf{i}_{DQ}^T \frac{d\mathbf{L}_{rs(2 \times 3)}}{d\theta} \mathbf{i}_{abc} - \mathbf{i}_{abc}^T \frac{d\mathbf{L}_{sr(3 \times 2)}}{d\theta} \mathbf{i}_{DQ} + \mathbf{i}_{DQ}^T \frac{d\mathbf{L}_{rr(2 \times 2)}}{d\theta} \mathbf{i}_{DQ} \right) \quad (2-22)$$

公式中的 $\mathbf{L}_{ss}$ 、 $\mathbf{L}_{sr}$ 、 $\mathbf{L}_{rs}$ 、 $\mathbf{L}_{rr}$ 在前一节 PD 模型部分已经给出，将其代入公式(2-22)可得：

$$\mathbf{i}_{abc}^T \frac{d\mathbf{L}_{ss(3 \times 3)}}{d\theta} \mathbf{i}_{abc} = 2L_B \begin{pmatrix} +\sin 2\theta i_a^2 + 2\sin 2(\theta - 60^\circ) i_a i_b + 2\sin 2(\theta + 60^\circ) i_a i_c \\ +\sin 2(\theta - 120^\circ) i_b^2 + 2\sin 2\theta i_b i_c + \sin 2(\theta + 120^\circ) i_c^2 \end{pmatrix} \quad (2-23)$$

其中 L_B 为：

$$L_B = \frac{L_{md} - L_{mq}}{3} \quad (2-24)$$

$$-\mathbf{i}_{abc}^T \frac{d\mathbf{L}_{sr(3 \times 2)}}{d\theta} \mathbf{i}_{DQ} = \begin{cases} -L_{md} i_D (\cos \theta i_a + \cos(\theta - 120^\circ) i_b + \cos(\theta + 120^\circ) i_c) \\ +L_{mq} i_Q (\sin \theta i_a + \sin(\theta - 120^\circ) i_b + \sin(\theta + 120^\circ) i_c) \end{cases} \quad (2-25)$$

$$-\mathbf{i}_{DQ}^T \frac{d\mathbf{L}_{rs(2 \times 3)}}{d\theta} \mathbf{i}_{abc} = \frac{2}{3} \begin{cases} -L_{md} i_D (\cos \theta i_a + \cos(\theta - 120^\circ) i_b + \cos(\theta + 120^\circ) i_c) \\ +L_{mq} i_Q (\sin \theta i_a + \sin(\theta - 120^\circ) i_b + \sin(\theta + 120^\circ) i_c) \end{cases} \quad (2-26)$$

将公式整理可得电磁转矩 T_e 的公式如下所示：

$$T_e = \frac{P}{2} \left\{ \frac{2(L_{md} - L_{mq})}{3} \begin{pmatrix} +\sin 2\theta i_a^2 + 2\sin 2(\theta - 60^\circ) i_a i_b + 2\sin 2(\theta + 60^\circ) i_a i_c \\ +\sin 2(\theta - 120^\circ) i_b^2 + 2\sin 2\theta i_b i_c + \sin 2(\theta + 120^\circ) i_c^2 \end{pmatrix} + \frac{5}{3} \begin{cases} -L_{md} i_D (\cos \theta i_a + \cos(\theta - 120^\circ) i_b + \cos(\theta + 120^\circ) i_c) \\ +L_{mq} i_Q (\sin \theta i_a + \sin(\theta - 120^\circ) i_b + \sin(\theta + 120^\circ) i_c) \end{cases} \right\} \quad (2-27)$$

代入三角函数和差化积公式，可对公式(2-27)进行化简，可得简化电磁转矩公式如下：

$$T_e = \frac{P}{2} \left\{ \begin{aligned} & \frac{2(L_{md} - L_{mq})}{3} \left(\left(i_a^2 - \frac{1}{2}i_b^2 - \frac{1}{2}i_c^2 - i_a i_b - i_a i_c + 2i_b i_c \right) \sin 2\theta \right. \\ & \quad \left. + \frac{\sqrt{3}}{2} (i_b^2 - i_c^2 - 2i_a i_b + 2i_a i_c) \cos 2\theta \right) \\ & + \frac{5}{3} \left\{ \begin{aligned} & -L_{md} i_D \left(\left(i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c \right) \cos \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} (i_b - i_c) \sin \theta \right) \\ & + L_{mq} i_Q \left(\left(i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c \right) \sin \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} (i_b - i_c) \cos \theta \right) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2-28)$$

2.2.3 FPGA 仿真实现

电磁转矩和机械转速的计算，局限于三角函数和四则运算，不存在微分和积分的内容，因此在小步长仿真中无需额外进行离散化操作，可以直接用公式(2-20)和(2-28)计算。此外，由于前一节的方程推导已经将机械转矩原本公式里的矩阵乘除内容化简了，因此在 FPGA 仿真中可以直接线性计算。

需要注意的是，FPGA 程序中无法直接进行三角函数的计算。目前主流的方法是调用板卡的 ROM，对应的 IP 核是 Block Memory Generator，具体的逻辑是，将一个周期内的正余弦数值取 n 个点，将所有参数储存到 ROM 核中，需要计算三角函数的时候，将对应的输入映射为 ROM 核的地址，再根据不同的地址输出不同的正余弦数值。利用 ROM 核计算三角函数基本逻辑如图 2-8 所示。

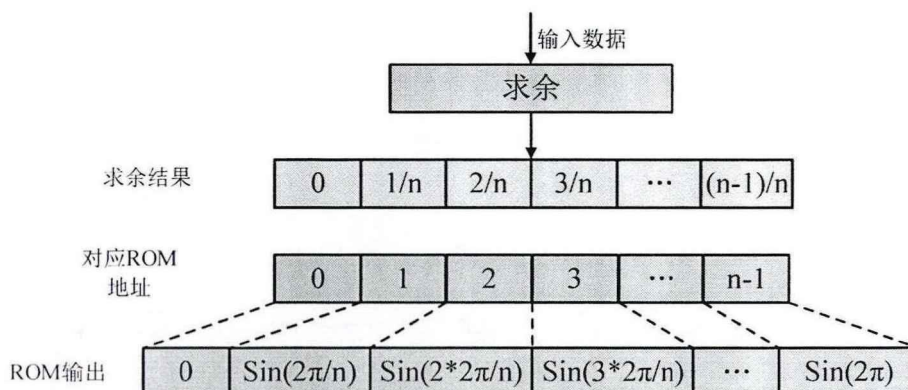


图 2-8 利用 ROM 核计算三角函数

此外，随着 Xilinx 公司对 vivado 软件的不断开发和完善，现在已经有了可供调用的三角函数计算 IP 核。虽然 FPGA 仍然无法直接计算三角函数，但可以通过调用 IP 核的方式间接解决这个问题。

Xilinx 公司的 LogiCORE™ CORDIC IP 核在 FPGA 板卡上实现了坐标旋转数字计算方法（Coordinate Rotation Digital Computer, CORDIC），可用于基于硬件

的三角函数、双曲线、指数、对数、平方根的计算。需要注意的是 CORDIC 核对输入输出的数据有结构要求，无法直接处理 IEEE 754 标准单精度浮点数结构的数据。因此在计算三角函数时，需要在之前调用浮点数转定点数 IP 核，计算之后需要调用定点数转浮点数 IP 核。在 FPGA 下实现的逻辑如图 2-9 所示。

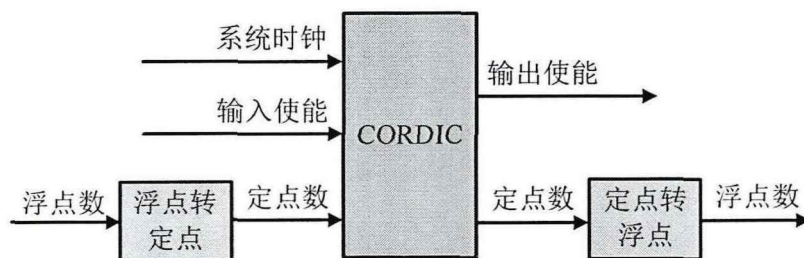


图 2-9 利用 CORDIC 计算三角函数

此外，在发电机部分计算时，当前步长需要调用当前步长的转子角 θ 进行计算。电磁暂态过程中转速变化量非常小，可以用上一步长的机械转矩和电磁转矩预测当前步长的转子转速，再用转速计算转子角，具体的预测公式如下：

$$\frac{d\omega(t-\Delta t)}{dt} = \frac{P}{J} [T_M - T_e(t-\Delta t)] \quad (2-29)$$

$$\omega(t) \approx \omega(t-\Delta t) + \Delta t \times \frac{d\omega(t-\Delta t)}{dt}$$

电磁暂态过程中转速变化量非常小，其实也可以用上一步长的转速代替；用公式(2-29)进行预测转速变化，会在不占用太多计算资源的情况下增加小步长仿真精度。

2.3 换流器部分

如图 2-1 所示，完整永磁同步风力发电机采用的是全功率三相六桥臂变换器，两个变换器以背靠背的形式通过直流侧相连，被称为背靠背变换器，整流和逆变两侧各连接了一个平波电抗，直流侧并联一个电容进行稳压。常见的电力电子变换器模块建模方法有：详细模型、开关函数模型、平均模型等，详细模型又可根据对单独元件建模方法的不同分为二值电阻法和 LC 等效法。二值电阻法主要应用于以 PSCAD/EMTDC 等为代表的离线仿真软件，用来模拟开关的导通和关断状态^[58]。由于常规的电力电子变换器建模方法的支路参数会随着开关状态变化而变化，在用节点电压法计算电磁暂态方程时需要每个步长进行一次导纳矩阵的求逆，计算量很大。因此在目前的小步长仿真中主要考虑恒导纳思想进行变换器的建模。

受器件开关过程应力约束影响，一般风力机的容量越大，VSC 的开关频率

越小。2-3MW 的风力发电机组开关频率一般为 2-3kHz，最高也不超过 5kHz。这个开关频率可以用添加电阻的伴随离散电路（Associated Discrete Circuit, ADC）模型仿真，可以较好的解决虚拟功率损耗的问题。

2.3.1 开关建模及 FPGA 实现

添加电阻的伴随离散电路（Associated Discrete Circuit, ADC）模型是目前应用最为广泛的电力电子器件恒导纳建模方法，被广泛应用于 RTDS、RT-LAB 等实时仿真平台中^[58]。RTDS 小步长元件库中的电力电子器件 ADC 模型如 2-10 图所示

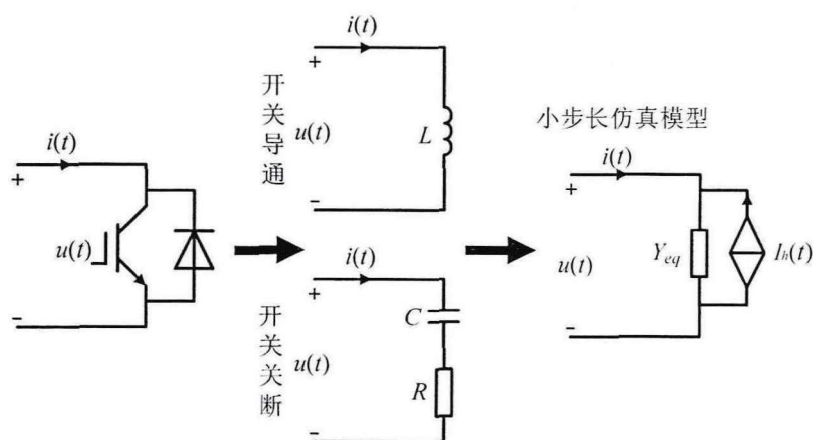


图 2-10 电力电子器件 ADC 模型

在添加电阻的伴随离散电路模型中，用电感支路等效电力电子器件的导通状态，用电容电阻串联支路等效电力电子器件的关断状态。其中电感电容电阻的参数会影响模型的稳定性和模型精度，最小化功率损耗下的模型参数公式如下所示^[58]：

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \frac{1}{2(\sqrt{\delta^2 + 1} - \delta)} \\ L = \frac{\sqrt{2}(\Delta t F)U}{I} \\ C = \frac{(\Delta t F)^2}{L} \\ R = \frac{2L}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{2C} \end{array} \right. \quad (2-30)$$

公式(2-30)中的 U 为开关的额定电压，即为直流侧的额定电压，在工程中一般为两倍交流侧相电压峰值。 I 为开关额定的电流，即为交流侧的相电流幅值。 δ

为阻尼系数,开关切换的时候会产生震荡,串联一个电阻在电容上用来衰减震荡。阻尼系数越大震荡越小,典型值为 0.9。 Δt 为离散域的时间步长,本次仿真的步长为 $10\mu\text{s}$ 。

通过添加电阻的伴随离散电路模型将开关等效为电感和电容串电阻的形式后,需要对其进行离散化建模,以应用于小步长仿真当中。采用隐式梯形差分法对其进行差分化建模,建立的诺顿等效公式如下:

$$Y_{eq} = \frac{\Delta t}{2L} = \frac{2C}{2CR + \Delta t}$$
$$I_h(t) = \begin{cases} -i(t-\Delta t) - Y_{eq}u(t-\Delta t) & on \\ (1-2RY_{eq})i(t-\Delta t) + Y_{eq}u(t-\Delta t) & off \end{cases} \quad (2-31)$$

具体的公式推导会在基础无源元件建模的部分给出,在此直接给出诺顿等效后的公式(2-31)。

电力电子器件经过小步长仿真模型,建模后得到的等效导纳 Y_{eq} 与电力电子器件的开关状态无关,开关状态变换只影响等效历史电流源 $I_h(t)$ 的计算。因此在 FPGA 建模时,采用恒导纳思路建立的换流器模块中等效导纳矩阵是恒定的。但是在整个完整永磁同步发电机模型中,发电机模块的等效导纳矩阵时变,导致整个系统的等效导纳矩阵时变。如果有一种方法能使发电机模块的等效导纳矩阵恒定,则整个网络的等效导纳矩阵也能恒定,在进行小步长仿真时无需每个步长进行矩阵求逆。

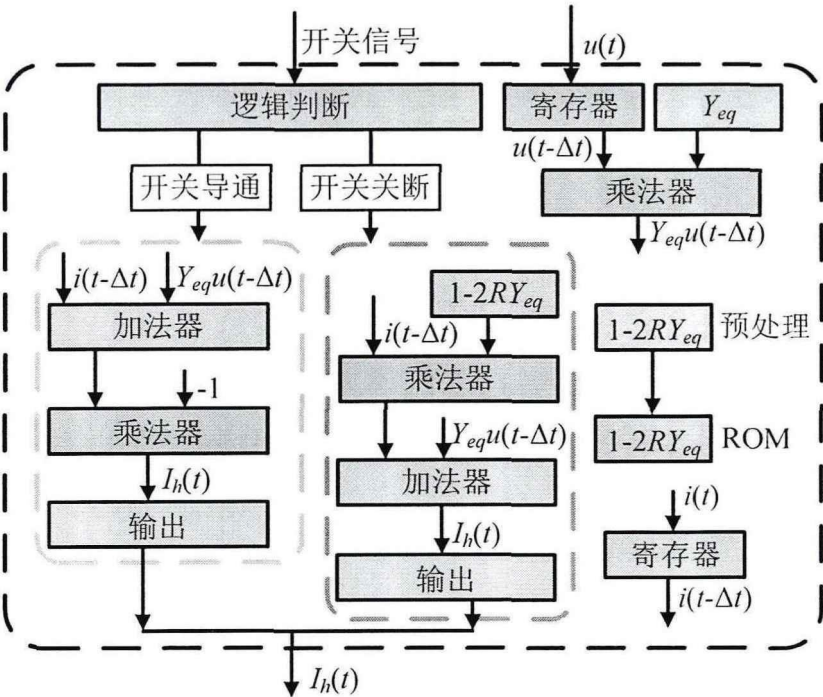


图 2-11 电力电子器件 FPGA 仿真实现

在仿真过程中每个步长需要将当前步长的电压电流量存入寄存器,用于下一个步长调用。在仿真开始前需要提前对 $1-2RY_{eq}$ 进行预处理,并将 $1-2RY_{eq}$ 和 Y_{eq} 提前存入 ROM 核中,在每个步长的仿真计算中调用即可。在进行 FPGA 仿真时,单个换流器的历史电流源计算逻辑如图 2-11 所示。

2.3.2 控制建模及 FPGA 实现

上一小节详细介绍了电力电子元件的一次电路部分建模方法,以及举例说明了单个电力电子变换器如何在 FPGA 逻辑下进行建模。这一小节着重在于解释换流器机侧及网侧控制部分的建模基本逻辑,以及 PI 模块、直角坐标转极坐标、极坐标转直角坐标、派克变换、派克反变换的基本方法。

本次模型中机侧采用定机侧有功和定交流电压控制,网侧采用定直流电压和定交流电压控制。基础控制逻辑如图 2-12 所示。

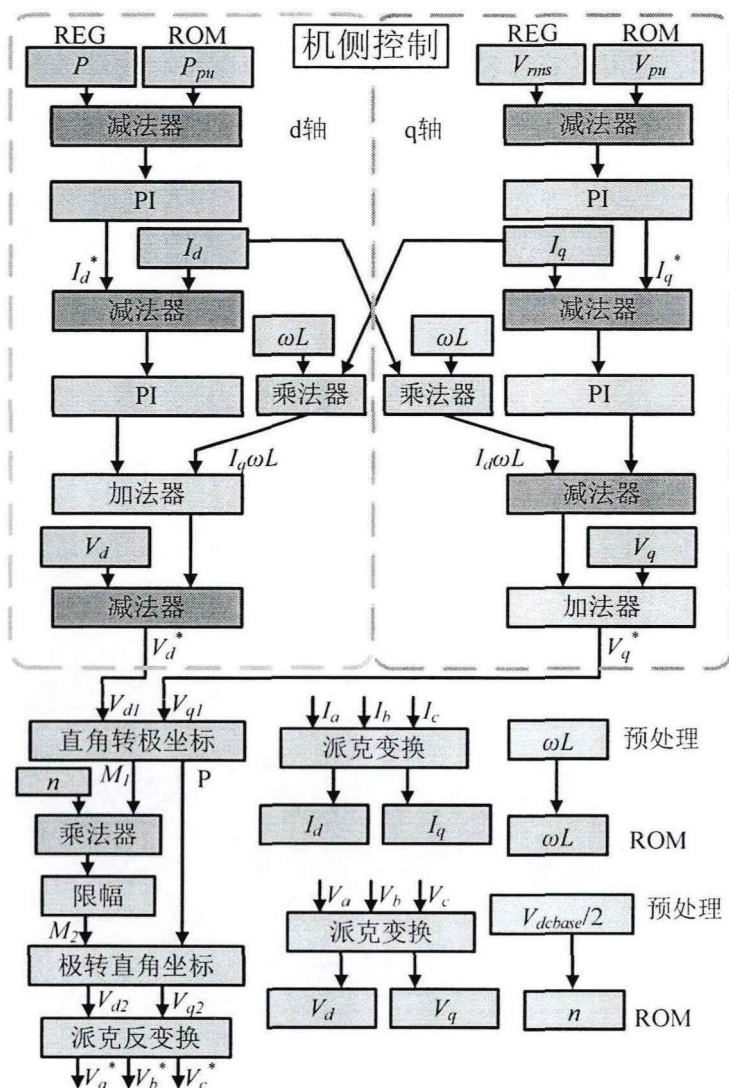


图 2-12 基础控制逻辑

图 2-12 给出的是机侧控制的基础逻辑，网侧控制与机侧除了输入参数不同，其他大同小异，不再赘述。永磁直驱发电机转子的 dq 轴是以永磁体磁链方向定义的，发电机出口端的锁相环 dq 轴一般是以电网电压方向定义的；忽略出口端电阻的情况下两种定义的 dq 轴会相差 90° 。因此在 FPGA 仿真中机侧部分可以用发电机转子旋转的相位加上 90° 来代替锁相环模块。至于网侧部分，本次仿真网侧采用的是无穷大电源，网侧锁相环相位可以用电网相位代替。

在控制系统仿真建模中需要进行派克变换与派克反变换的计算。派克变换公式如下所示^[57]。

$$f_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

派克反变换公式如下所示：

$$f_{abc} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

在 FPGA 仿真中，派克变换和派克反变换需要进行三角函数计算，调用前一节介绍过的 CORDIC 核直接计算即可。

直角坐标和极坐标相互转换的模块在 FPGA 下实现的逻辑也不困难，由于控制部分只对极坐标下的模 M 进行了计算，没有对角度有任何的影响，因此转换过程中 V_d 、 V_q 、模三者的比例始终保持不变，满足如下公式：

$$V_{d1} : V_{q1} : M_1 = V_{d2} : V_{q2} : M_2 \quad (2-34)$$

对极坐标的模进行的乘法、除法、限幅运算，对应到直角坐标的比例也是一样的。满足公式如下：

$$V_{d2} = \frac{M_2}{M_1} V_{d1}, V_{q2} = \frac{M_2}{M_1} V_{q1} \quad (2-35)$$

因此极坐标和直角坐标的相互转换在 FPGA 中可以用乘法器和除法器实现，具体的逻辑不再赘述。

在控制部分，还有 PI 控制模块需要进行有针对性的建模。PI 控制模块全称为比例积分控制器（Proportional-Integral Control），其中 P 指的是比例控制，代表了测量期望值和测量值之间的差异，比例值是当前位置的量度；I 指的是积分控制，会随着时间的推移对误差进行积分，是误差的历史累积值。在 FPGA 中，需要对比比例积分控制进行离散域的小信号建模。目前常用的 PI 控制器小步长仿真模型如下所示^[60]：

$$P(t) = K_p \times In(t)$$

$$I(t) = I(t - \Delta t) + K_i \times \frac{\Delta t}{2} \times [In(t) + In(t - \Delta t)] \quad (2-36)$$

$$Out(t) = P(t) + I(t)$$

公式中， $In(t)$ 是PI控制的输入， $Out(t)$ 是PI控制的输出。 $P(t)$ 是比例控制的输出项， $I(t)$ 是积分控制的输出项。 K_p 是比例控制的参数， K_i 是积分控制的参数， Δt 是离散域的时间步长。离散域PI控制器对应的FPGA模型如图2-13所示。

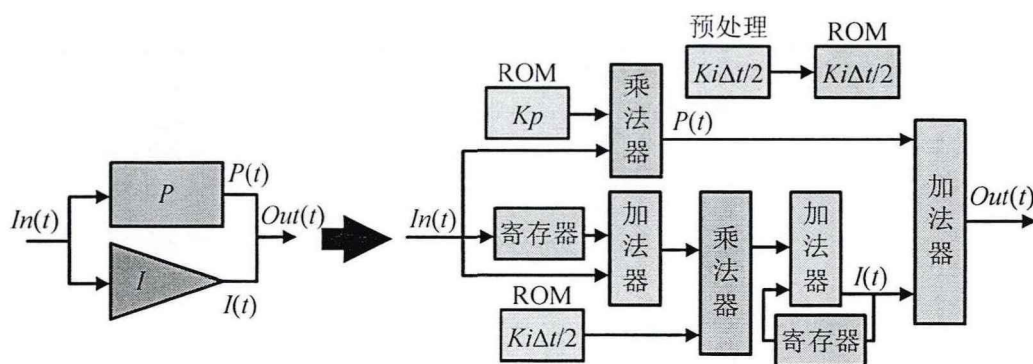


图 2-13 离散域 PI 控制器 FPGA 模型

到此为止，换流器控制部分的基本逻辑和搭建所需要的模块已经介绍完成。

2.4 其他模块

前面几个小节主要介绍了永磁同步发电机中几个重要的模块。该小节主要介绍在风力机、发电机、换流器三个重要模块之外的部分，这部分的数学模型如何搭建，以及如何在FPGA逻辑下实现。

2.4.1 无源元件建模及FPGA实现

永磁直驱风机网架结构内的基础无源元件主要为机侧平波电抗 L_1 、直流侧电容 C_1 、网侧平波电抗 L_2 和网侧电容滤波 C_2 、具体如图2-1所示。基于EMTP算法^[15]，采用隐式梯形积分法可以将电路里的LC元件差分化，得到诺顿等效形式的小步长仿真模型。差分化诺顿等效示意图如图2-14所示：

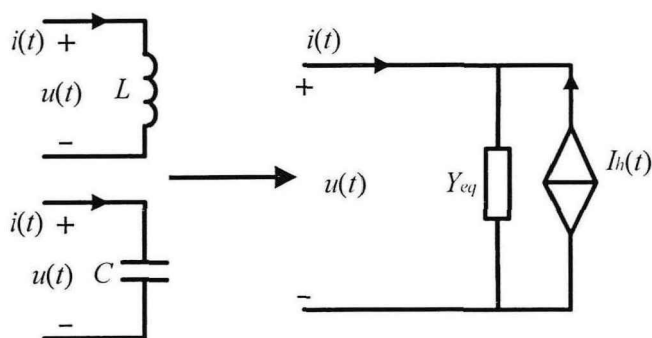


图 2-14 差分化诺顿等效示意图

电感元件的电压电流关系表达式如公式(2-37)所示：

$$u(t) = \frac{L di(t)}{dt} \quad (2-37)$$

对公式(2-37)带入隐式梯形积分法求解，可得到电感元件的差分化模型：

$$di(t) = \frac{u(t) dt}{L} \quad (2-38)$$

$$\int_{t-\Delta t}^t di(t) = \int_{t-\Delta t}^t \frac{u(t)}{L} dt \quad (2-39)$$

$$i(t) - i(t - \Delta t) = \frac{1}{L} \times \frac{u(t) + u(t - \Delta t)}{2} \times \Delta t \quad (2-40)$$

则流过电感的电流 i_L 可表示为：

$$i(t) = \frac{\Delta t}{2L} u(t) + \frac{\Delta t}{2L} u(t - \Delta t) + i(t - \Delta t) \quad (2-41)$$

根据公式(2-41)可表示出电感元件离散化并诺顿等效后的等效导纳 Y_{eq} 和等效电流源 $I_h(t)$ 如下所示：

$$\begin{cases} Y_{eq} = \frac{\Delta t}{2L} \\ I_h(t) = -i(t - \Delta t) - Y_{eq} u(t - \Delta t) \end{cases} \quad (2-42)$$

等效电流源 $I_h(t)$ 是由上一步长的电流和电压计算得到的，因此诺顿等效中的 $I_h(t)$ 参数也常常被称为历史受控电流源。

同理可得电容元件离散化并诺顿等效后的等效导纳 Y_{eq} 和等效电流源 $I_h(t)$ 如下所示：

$$\begin{cases} Y_{eq} = \frac{2C}{\Delta t} \\ I_h(t) = i(t - \Delta t) + Y_{eq} u(t - \Delta t) \end{cases} \quad (2-43)$$

对比分析电感电容的等效导纳 Y_{eq} 和等效电流源 $I_h(t)$ 参数，可以发现等效导纳 Y_{eq} 参数只与电感电容的参数有关，在程序运行时始终保持不变。并且无论是电感还是电容，在电流表达式中 $u(t-\Delta t)$ 的系数与 $u(t)$ 的系数始终一致，都为 Y_{eq} 。

因此在 FPGA 建模中可以有针对性的进行一些计算优化。一方面，在系统计算之前可以通过电感电容参数预处理计算得到等效导纳 Y_{eq} 参数，并提前储存至 FPGA 的 ROM 存储器 IP 核中，在计算过程中直接调用即可。另一方面，由于程序是随着时间推移不断迭代的，当前步长的 $Y_{eq}u(t)$ 即为下一个步长的 $Y_{eq}u(t-\Delta t)$ 。因此在每个步长计算得到 $Y_{eq}u(t)$ 后，将其存储至寄存器中，下一个步长需要 $Y_{eq}u(t-\Delta t)$ 的数据时直接调用即可，减少 IP 核的使用和板卡的资源消耗。电容电感元件离散计算模型针对 FPGA 优化后的计算逻辑如图 2-15 所示。

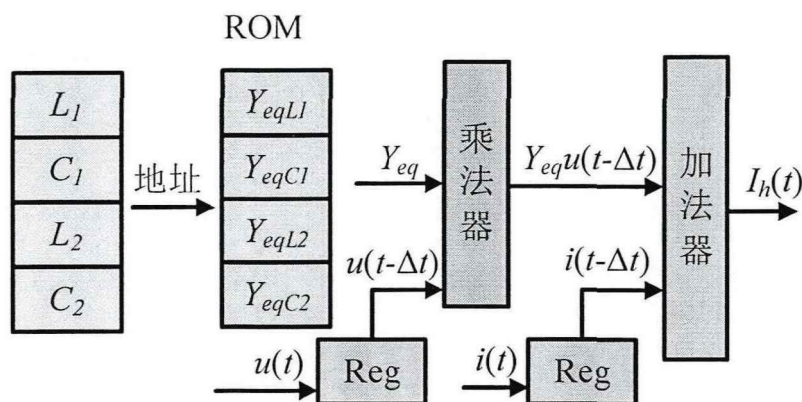


图 2-15 电容电感元件 FPGA 计算逻辑

FPGA 计算时，先预处理各个电感电容的等效导纳参数并储存至 ROM 存储器 IP 核中，运算的时候通过地址调用各个等效导纳参数。每个步长计算时都同时将电压 $u(t)$ 电流参数 $i(t)$ 导入寄存器中储存，等待下一个步长调用计算。下一步长计算时调用寄存器中的 $u(t-\Delta t)$ 和 $i(t-\Delta t)$ 参数，带入历史电流源公式中计算 $I_h(t)$ 。

2.4.2 无穷大电源建模及 FPGA 实现

本次主要是对永磁同步发电机的模型进行研究，不涉及电网的波动；忽略电力系统中的扰动，可以假定永磁同步发电机连接的电网为无穷大电网，等效为一个理想电压源。则三相理想电压源的公式可表示为：

$$\begin{aligned} V_a &= V_{base} \sin(100\pi t) \\ V_b &= V_{base} \sin(100\pi t - 120^\circ) \\ V_c &= V_{base} \sin(100\pi t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2-44)$$

公式中 V_{base} 为电网侧电压的基准值。前面章节已经介绍过 FPGA 环境下的三角函数计算，调用浮点数转定点数 IP 核、CORDIC 三角函数计算 IP 核、定点数转浮点数 IP 核即可。

2.5 PMSG 系统建模

上面几个小节已经对永磁同步风力发电机的模块和元件进行了数学建模，并且针对 FPGA 环境进行了逻辑优化。本小节主要介绍仿真模型在系统层面是如何运行的，模型架构是如何组合的。

在本次建模过程中，模型的参数已经提前设定好，并输入存储进 FPGA 程序中的 ROM 核了，仿真运行时直接调用即可。并且本次仿真不存在与其他板卡 and 上位机通信的部分，不需要设置通信模块。

2.5.1 顶层设计

由于本次仿真不需要进行外部的输入，仿真规模也仅限于一块 FPGA 板卡，不涉及板卡间通信。因此顶层设计可以搭建的相对简单，顶层包括板卡时钟模块、模型预处理计算模块、风速输入模块、电路计算模块、数据输出模块。具体的 FPGA 顶层设计示意图如图 2-16 所示。

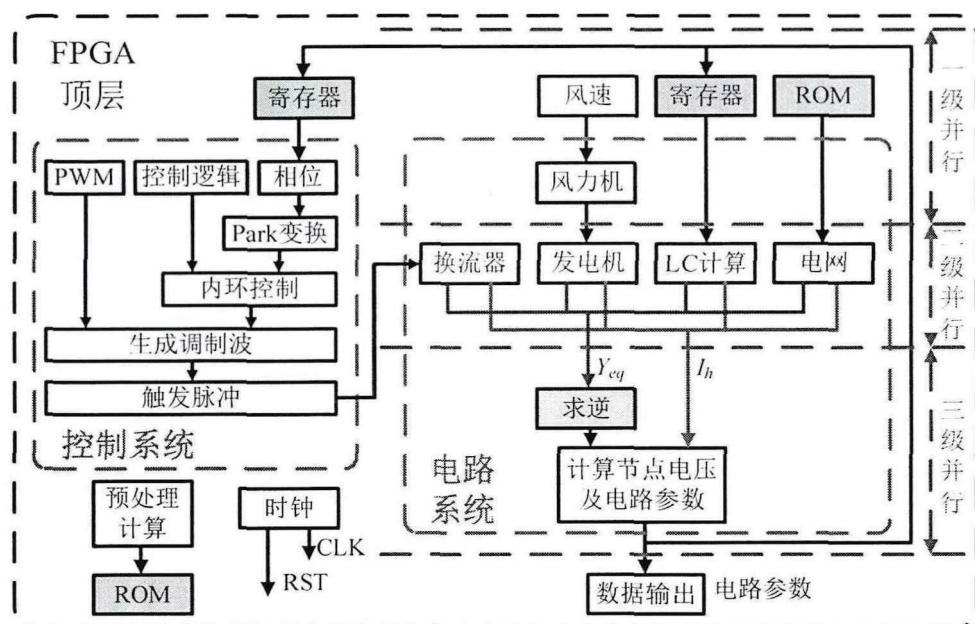


图 2-16 FPGA 顶层设计

在顶层设计中，可将各个模块根据互相不同的逻辑关系进行模块级并行处理。如图 2-16 所示，运用节点电压法计算时可以将整体计算逻辑分成三级并行。需要注意的是，控制系统与电路计算系统互相属于并行计算，存在一个步长的数

据差,控制部分的具体逻辑并行会在后面的章节解释,在此图中电路计算模块的三级并行不包括控制系统。

节点电压法可将顶层设计下的计算模块分为三级并行。在第一级并行中,各类元件主要用于计算子系统的输入参数,包括上一步长支路电流、节点电压参数更新,风力机出力计算等部分。在第二级并行中,各类元件需要计算历史电流源,通过输入控制信号判断电力电子器件的开关状态,生成历史电流源列向量;此外也需要计算各个节点的节点导纳参数,生成系统的节点导纳矩阵。在第三级并行中,对导纳矩阵求逆计算,并进行线性方程组求解,计算出各个节点的节点电压。此外,更新各个节点和支路的电路参数,以便下一时步计算。需要注意的是,三级并行中互相间属于串行计算逻辑,在三级并行内部互相间属于并行计算。

2.5.2 电路系统

上一小节已经对顶层设计的基本逻辑和结构进行了解释,该小节主要解释电路系统内部的模块的作用、输入输出、以及交互逻辑,还有电路计算的基本公式。

2.5.2.1 模块交互

板卡时钟模块主要作用是产生全局时钟 CLK 和复位信号 RST。在 Vivado 软件中可以直接用代码阻塞赋值的方式生成时钟,但是此方法生成的时钟在仿真过程中会有波动,直接用阻塞赋值生成会导致误差,影响仿真精度。因此需要先调用开发板上的 200MHz 差分时钟正端 sys_clk_p 和负端 sys_clk_n,并将其输入差分信号缓冲器 IBUFDS,得到 200MHz 的差分时钟,再调用 Vivado 平台提供的 Clocking Wizard IP 核,对其分频,得到所需要的系统仿真时钟 CLK 和复位信号 RST。时钟模块的输入是板卡全局差分时钟,输出是仿真时钟 CLK 和复位信号 RST。

模型预处理计算模块主要作用是计算各个子系统的常量。常量是在小步长仿真过程中维持不变的量,不需要每个步长计算一次,只需要在仿真开始之前提前预处理并存入 ROM 核即可。预处理计算模块的输入是永磁同步发电机各个子系统的基本参数。如风力机子系统的额定机械功率、空气密度、叶片扫掠面积、叶片半径、最优攻角等;发电机子系统的额定功率、额定输出电压、额定频率、各个绕组的电阻电抗值、转动惯量、极对数等;LC 模块的机侧平波电抗参数、直流侧电容参数、网侧平波电抗参数、网侧电容滤波参数;换流器控制子系统的 dq 轴 PI 控制参数;换流器子系统的额定开关电压、额定开关电流;电网系统的电压等。总而言之,这个模块的作用是将系统内所有常量都提前预处理并存入 ROM 核中,在小步长仿真开始之后不再计算,直接调用 ROM 核内的参数,以

达到减少板卡的资源占用，加快仿真速度的目的。

风速模块的作用其实和预处理计算模块有些类似，处理的同样是数据预存的工作。风速模块将仿真过程中的风速变化提前存入 ROM 核中，由地址一一对应，仿真过程中通过对应的地址调用 ROM 核的数据，可以用来仿真研究风速对永磁同步发电机的影响。

换流器控制模块的主要作用是通过 PWM 载波的方式，确定全功率三相六桥臂共 12 个电力电子变换器的控制信号和工作状态。模块的仿真输出是上一步长网络的节点电压、支路电流和上一步长的发电机相位、电网相位，此外也需要从 ROM 核读取 PI 控制器的参数。由于在正常运行状态下背靠背换流器的上下桥臂不能同时导通，也不能同时关断，控制信号是相反的。因此一侧的六个变换器的六个控制信号本质上是三个控制信号。换流器控制模块的仿真输出是机侧网侧一共六个控制信号。

数据输出模块的原理和逻辑比较简单，通过 Vivado 软件的 `dout_file` 代码可以将每个步长的仿真数据输出至文件中，供后续的画图等程序调用。需要注意的是，在 FPGA 的仿真过程中，数据类型始终是 IEEE754 标准的单精度二进制 32 位浮点数，输出至文件中的数据类型也同样是单精度浮点数，需要用 MATLAB 软件的 `typecast` 代码将二进制浮点数转为十进制数，才可进行后续的操作。

电路计算模块是仿真的核心程序，包含了完整的永磁同步风力发电机模型，包括风力机子系统、发电机子系统、换流器子系统、LC 计算子系统、电网子系统、导纳矩阵求逆模块、电路参数计算模块等。具体的模块并行串行计算逻辑在图 2-16 里已经表达的比较清晰了，这里着重解释各个子系统和模块的参数输入输出关系。

风力机模块输入的是当前步长的风速和前一步长的发电机转速，输出的是风力机的机械功率和机械转矩。发电机子系统输入的是当前步长的机械功率和机械转矩，以及上一步长的电路参数；输出当前步长的转子转速以及发电机诺顿等效的电流源和导纳参数。

换流器模块的输入是背靠背换流器的六个控制信号以及前一步长的电路参数，输出电力电子器件诺顿等效的电流源和导纳参数，电力电子器件的历史电流源互不相同，一共有 12 个参数；同一侧的导纳参数互相相同，一共有 2 个。LC 计算子系统主要计算的是机侧网侧平波电抗，直流侧电容和电网侧电容滤波；输入是上一步长的电路参数，输出是诺顿等效的电流源和导纳参数。电网子系统是无穷大电压源，电压的波动和电网侧无关，不存在输入参数，输出诺顿等效的电流源和导纳参数。

导纳矩阵求逆模块的作用就是每个步长输入永磁同步发电机的节点导纳矩

阵，并对其进行求逆，输出节点导纳矩阵的逆矩阵。由图 2-1 可知，完整永磁同步发电机一共有 14 个节点，节点导纳矩阵一共 14 阶，需要同时输入输出 196 个参数。每个步长进行一次 14 阶矩阵求逆，这对于 FPGA 来说资源消耗量太大了，会严重拖累仿真的进程。

电路参数计算模块主要作用就是通过前面模块计算出的诺顿等效历史电流源整理出每个节点的历史电流源列向量。此外，通过公式(2-45)可计算出模型中每个步长的节点电压。

$$\mathbf{v}_{N(14 \times 1)} = \mathbf{Y}_{(14 \times 14)}^{-1} \mathbf{i}_h(14 \times 1) \quad (2-45)$$

随后通过计算出的当前步长节点电压计算每个支路的支路电流，更新整个网络的状态。随后将电压电流量输入寄存器，供下一个步长调用。也将电压电流量提供给数据输出模块输出。

2.5.2.2 电路计算

上一部分着重讲述了程序电路计算系统的模块输入输出和交互逻辑，接下来解释完整永磁同步发电机节点导纳矩阵的形成，计算和分析。

首先将完整电路图表示成诺顿等效的形式如图 2-17 所示。除发电机支路电压电流方向特别指定之外，其他支路离散电源方向皆与电路给定方向相反。

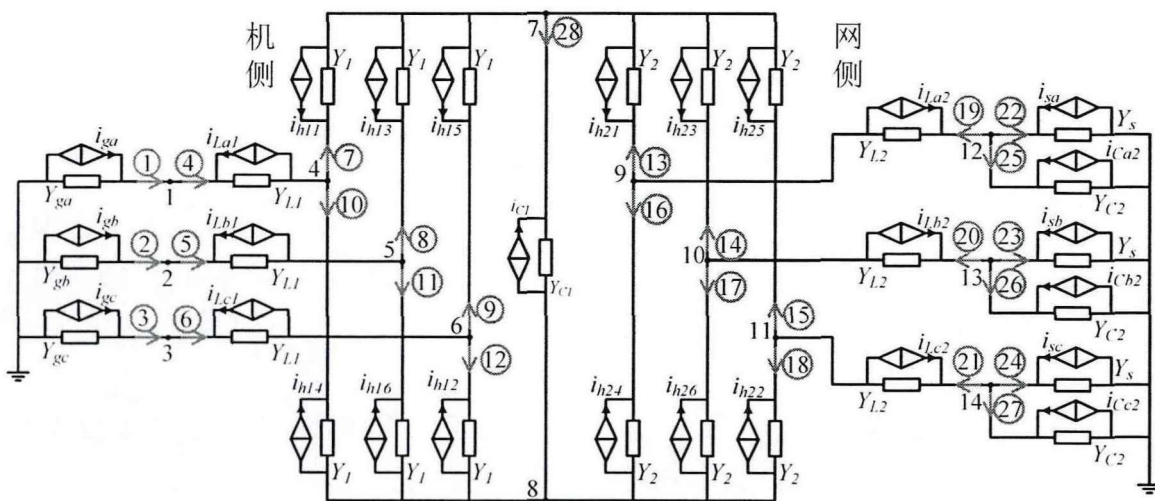


图 2-17 完整永磁同步发电机诺顿等效图

如图 2-17 所示，永磁同步发电机完整诺顿等效图中一共有 14 个节点，28 条支路。整理出每个节点的 KCL 方程，整理在一起，可以列写出完整的节点导纳矩阵。完整的节点导纳公式为：

$$\left[\mathbf{Y}_{(14 \times 14)} \right] \left[\mathbf{v}_{N(14 \times 1)} \right] = \left[\mathbf{i}_h(14 \times 1) \right] \quad (2-46)$$

完整的节点导纳矩阵是 14 阶的稀疏矩阵，整体的矩阵太大，为了方便讲述，该小节将其拆分。将节点导纳矩阵按照电路逻辑关系简单划分为发电机部分（节点 1-3）、换流器机侧端口（节点 4-6）、换流器部分（节点 7-8）、换流器网侧端口部分（节点 9-11）和电网部分（节点 12-14），可以更加清晰的看出节点导纳矩阵和历史电流源列向量计算公式。节点导纳矩阵示意图如图 2-18 所示。

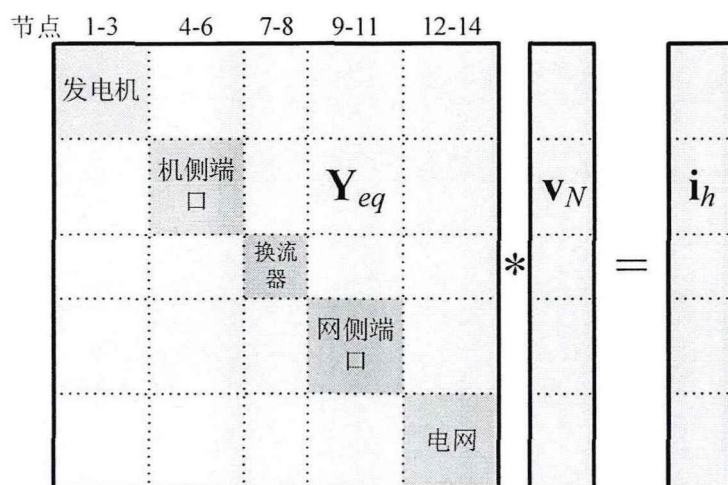


图 2-18 节点导纳矩阵示意图

发电机部分是节点 1-3，列写出这部分的节点导纳矩阵公式如下：

$$\begin{bmatrix} Y_{eqgen(1,1)} + Y_{L1} & Y_{eqgen(1,2)} & Y_{eqgen(1,3)} & -Y_{L1} \\ Y_{eqgen(2,1)} & Y_{eqgen(2,2)} + Y_{L1} & Y_{eqgen(2,3)} & -Y_{L1} \\ Y_{eqgen(3,1)} & Y_{eqgen(3,2)} & Y_{eqgen(3,3)} + Y_{L1} & -Y_{L1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{hgen(1,1)} + i_{La1} \\ i_{hgen(2,1)} + i_{Lb1} \\ i_{hgen(3,1)} + i_{Lc1} \end{bmatrix} \quad (2-47)$$

公式(2-47)中的 $i_{hgen}(t)$ 和 $Y_{eqgen}(t)$ 为发电机模型内部的等效电流源和等效导纳，具体的计算公式为(3-16)。对于图 2-17 而言， i_{ga} 为 $i_{hgen}(t)$ 的第一项， Y_{ga} 为 $Y_{eqgen}(t)$ 的第一行；同理， i_{gb} 和 i_{gc} 为 $i_{hgen}(t)$ 的第二、第三项， Y_{gb} 和 Y_{gc} 为 $Y_{eqgen}(t)$ 的第二、第三行。

可以列写出换流器机侧端口部分（节点 4-6）的节点导纳矩阵公式如下：

$$\begin{bmatrix} -Y_{L1} & 2Y_1 + Y_{L1} & -Y_1 & -Y_1 \\ -Y_{L1} & 2Y_1 + Y_{L1} & -Y_1 & -Y_1 \\ -Y_{L1} & 2Y_1 + Y_{L1} & -Y_1 & -Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_{La1} + i_{h11} + i_{h14} \\ -i_{Lb1} + i_{h13} + i_{h16} \\ -i_{Lc1} + i_{h15} + i_{h12} \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

可以列写出换流器部分（节点 7-8）的节点导纳矩阵公式如下：

$$\begin{bmatrix} -Y_1 & -Y_1 & -Y_1 & 3Y_1+3Y_2+Y_{C1} & -Y_{C1} & -Y_2 & -Y_2 & -Y_2 \\ -Y_1 & -Y_1 & -Y_1 & -Y_{C1} & 3Y_1+3Y_2+Y_{C1} & -Y_2 & -Y_2 & -Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_4 \\ v_5 \\ \vdots \\ v_{11} \end{bmatrix} \quad (2-49)$$

$$= \begin{bmatrix} i_{C1}-i_{h11}-i_{h13}-i_{h15}-i_{h21}-i_{h23}-i_{h25} \\ -i_{C1}-i_{h14}-i_{h16}-i_{h12}-i_{h24}-i_{h26}-i_{h22} \end{bmatrix}$$

同样的方式，可以列写出换流器网侧端口部分（节点 9-11）的节点导纳矩阵公式如下：

$$\begin{bmatrix} -Y_2 & -Y_2 & 2Y_2+Y_{L2} & & -Y_{L2} \\ -Y_2 & -Y_2 & & 2Y_2+Y_{L2} & -Y_{L2} \\ -Y_2 & -Y_2 & & 2Y_2+Y_{L2} & -Y_{L2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_7 \\ v_8 \\ \vdots \\ v_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_{La2}+i_{h21}+i_{h24} \\ -i_{Lb2}+i_{h23}+i_{h26} \\ -i_{Lc2}+i_{h25}+i_{h22} \end{bmatrix} \quad (2-50)$$

同理，可以列写出电网部分（节点 12-14）的节点导纳矩阵公式如下：

$$\begin{bmatrix} -Y_{L2} & & Y_{L2}+Y_{C2}+Y_s \\ & -Y_{L2} & & Y_{L2}+Y_{C2}+Y_s \\ & & -Y_{L2} & & Y_{L2}+Y_{C2}+Y_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_9 \\ v_{10} \\ \vdots \\ v_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{La2}+i_{Ca2}+i_{sa} \\ i_{Lb2}+i_{Cb2}+i_{sb} \\ i_{Lc2}+i_{Cc2}+i_{sc} \end{bmatrix} \quad (2-51)$$

在仿真计算中，每个步长都需要对十四阶的节点导纳矩阵求逆矩阵，虽然节点导纳矩阵为稀疏矩阵，但求逆这个计算量仍然是硬件仿真不可接受的。仔细观察永磁同步发电机的节点导纳矩阵，发现导纳矩阵只有在发电机部分三个节点一共九个参数是时变的，其余所有参数都是恒定的不变量。如公式(2-47)所示，时变的参数即为公式中包括发电机等效导纳 Y_{eqgen} 的 9 个参数。

发电机部分的导纳矩阵时变导致整个网络的导纳矩阵时变，导致整个网络在小步长仿真中需要每个步长进行一次导纳矩阵求逆。

如果能够找到一种方法，将发电机模型内的导纳矩阵恒定，则整个网络的导纳矩阵都能恒定，导纳矩阵求逆只需要在仿真开始之前预处理并存入 ROM 核即可，能够大大减少仿真的计算量。

基于这种思路，本文提出了一种基于虚拟阻抗补偿的永磁同步发电机恒导纳建模方法，通过在转子上补偿虚拟阻抗的方式使发电机导纳矩阵恒定，可建立 PMSG 完整恒导纳模型并进行电磁暂态仿真，能够节省大量的计算资源。具体的数学模型推导过程在第三章给出。

2.5.3 控制系统

前面一小节主要解释了整个程序的顶层模块是如何设计的，顶层下的电路计

算系统各个模块串并行逻辑关系。也解释了内部模块的模块输出输出的交互关系。这一小节主要对程序中控制部分的计算逻辑进行详细的解释说明。

对离线仿真而言，一次电路部分和二次控制部分一般是分开且串行求解^[62-63]，控制系统的计算落后电气系统一个步长，在仿真计算步长较小时该串行时序是能保证计算精度的。但是这样的计算逻辑会导致仿真计算的时间是两个系统计算时间的叠加，影响仿真速度。因此本次仿真主要采用电路和控制部分解耦并行计算方法^{[46][64]}。

仿真的一次电路部分和二次控制部分是系统级并行的关系，二者互相并行运算，互不干扰，一个步长运行结束后交换信息继续下一步长的计算。一个步长开始时，一次电路部分用上一步长的转矩量计算当前步长的相位，用相位计算当前步长的发电机节点导纳矩阵。用控制部分提供的上一步长控制信号计算换流器的历史电流源。其他模块则用上一步长的电压电流量计算各个子系统的历史电流源。最终整理出整个网络的节点导纳矩阵和历史电流源列向量，计算整个网络的节点电压，更新整个网络的电路参数。在同一个步长开始时，换流器控制部分的输入为上一步长的网络的节点电压和支路电流量，通过电路参数计算当前步长的控制信号。

随着一次电路部分和二次控制部分当前的仿真步长计算结束，一次电路将当前步长的电路参数传递给二次控制部分，供给下一个步长控制信号计算使用；同样，二次控制部分将当前步长计算得到的控制信号传递给一次电路部分，供给下一个步长一次电路计算使用。整体计算逻辑如图 2-19 所示。

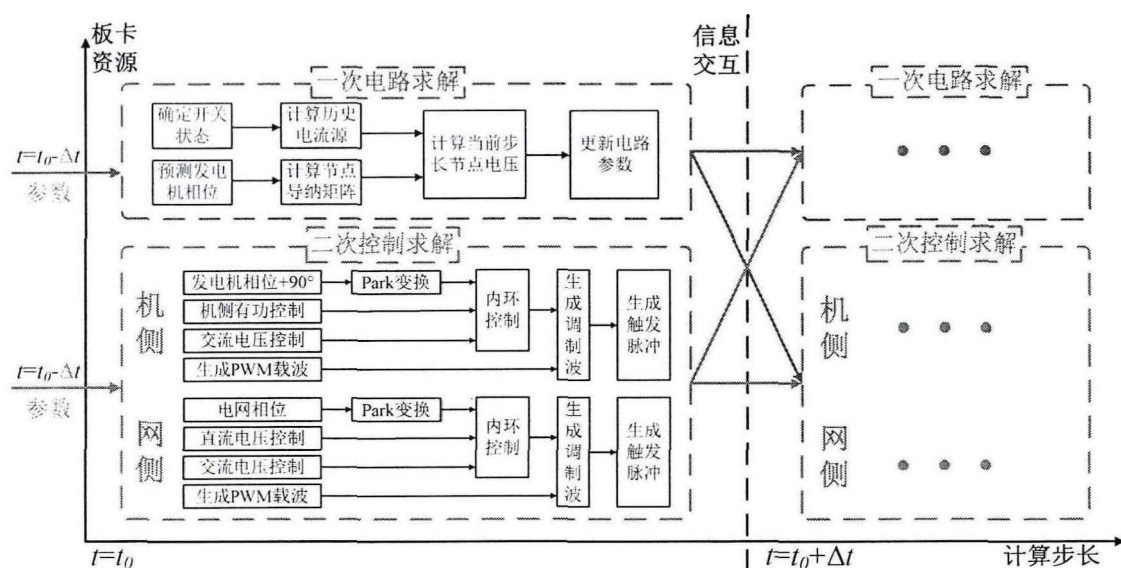


图 2-19 FPGA 电路部分与控制部分解耦并行计算方法

该模型机侧控制逻辑采用的是有功功率控制和机侧交流电压控制，网侧控制

逻辑采用的是直流电压控制和网侧交流电压控制。

2.6 本章小结

本章节在 FPGA 环境下搭建了永磁直驱发电机的数学模型。FPGA 的顶层设计下分别为电路系统和控制系统，二者成系统级并行。

电路系统包括风力机、永磁同步发电机、换流器、LC 电路、电网等模块，建立其数学模型，在 FPGA 下进行逻辑实现和计算优化。根据模块之间的相互串并行关系组成三级并行计算逻辑，分别用于计算子系统输入、计算诺顿等效参数、计算节点电压并更新电路。控制系统包括换流器机侧及网侧控制，与电路系统成解耦并行计算。

整理了完整永磁同步发电机的十四阶导纳矩阵，发现导纳矩阵时变的原因是发电机部分的导纳矩阵时变，如果发电机部分的矩阵能够恒定，则整个导纳矩阵可以恒定，避免每个步长的高阶矩阵求逆计算。于是在下一章节提出了一种发电机模型的恒导纳建模方法，具体内容将会在下一章节做详细推导。

第3章 发电机恒导纳模型

上一小节已经对 FPGA 下的永磁同步发电机模型的建立过程进行了详细的介绍, 由于电磁暂态计算采用的是节点电压法, 在建模完成后能写出整个完整永磁直驱风力发电机的十四阶节点导纳矩阵。导纳矩阵时变导致在小步长仿真时, 每个步长都必须进行一次高阶矩阵求逆, 占用大量板卡资源, 拖累仿真速度。

对十四阶节点导纳矩阵进行分析, 能够发现其时变的原因是发电机部分三个节点的节点导纳矩阵时变; 如果有一种方法能使发电机部分的导纳矩阵恒定, 则完整的节点导纳矩阵能够恒定, 不需要在每个步长都进行高阶矩阵求逆, 只需要在仿真开始之前进行一次预处理即可。

基于这种思路, 本文提出了一种永磁同步发电机的恒导纳建模方法。恒导纳是一种建模方法, 常用于 IGBT 等电力电子器件电磁暂态仿真建模^[65-66]; 在建立数学模型时采用等值近似, 将原本会因为元件状态变化的导纳恒定, 以达到简化计算的效果。目前电力电子器件恒导纳模型主要包括: ADC 模型^[67]、负电阻补偿模型^[58]、附加支路模型^[68]等, 相关成果已经被广泛应用在 RTDS、RT-LAB 等实时仿真平台。

目前国内外基于发电机的恒导纳建模研究还比较少, 本文提出的永磁同步发电机恒导纳建模方法基于电力电子器件的恒导纳思想, 参考了文献^[58]的 VSC 补偿电阻恒导纳模型。从传统发电机 PD 模型出发, 通过在转子上补偿虚拟阻抗的方式使发电机导纳矩阵恒定。具体的推导过程在下面小节给出。

3.1 整理发电机模型

在前面的章节已经介绍过永磁同步发电机的 PD 模型的电压磁链公式, PD 模型的电压方程如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abc} \\ \mathbf{v}_{DQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s & \\ & \mathbf{r}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{DQ} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abc} \\ \boldsymbol{\lambda}_{DQ} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

PD 模型的磁链方程如下:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abc} \\ \boldsymbol{\lambda}_{DQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss(3 \times 3)} & \mathbf{L}_{sr(3 \times 2)} \\ \mathbf{L}_{rs(2 \times 3)} & \mathbf{L}_{rr(2 \times 2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{DQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abcm} \\ \boldsymbol{\lambda}_{DQm} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

公式(3-1)与公式(3-2)已经给出了永磁同步发电机的基本方程, 在进行离散小步长电磁暂态计算时, 还需要通过隐式梯形差分法将其整理成 EMTP 型出口端电压电流的形式, 才可接入电网中进行仿真。隐式梯形差分法公式如下:

$$\begin{aligned} pi(t) &= A(t) \\ i(t) &= \frac{\Delta t}{2} \times [A(t) + A(t - \Delta t)] + i(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (3-3)$$

将永磁同步发电机的 PD 模型电压方程(3-1)用隐式梯形差分法(3-3)离散化可得:

$$\lambda_{abc}(t) = \frac{\Delta t}{2} \times [\mathbf{v}_{abc}(t) + \mathbf{v}_{abc}(t - \Delta t) + \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{abc}(t) + \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{abc}(t - \Delta t)] + \lambda_{abc}(t - \Delta t) \quad (3-4)$$

$$\lambda_{DQ}(t) = \frac{\Delta t}{2} \times [\mathbf{v}_{DQ}(t) + \mathbf{v}_{DQ}(t - \Delta t) - \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{DQ}(t) - \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{DQ}(t - \Delta t)] + \lambda_{DQ}(t - \Delta t) \quad (3-5)$$

将磁链方程(3-2)代入(3-4)和(3-5)并消去磁链项, 可得定子部分公式如下:

$$\begin{aligned} -\mathbf{L}_{ss}(t) \mathbf{i}_{abc}(t) + \mathbf{L}_{sr}(t) \mathbf{i}_{DQ}(t) + \lambda_{abcm}(t) = \\ \left\{ \begin{aligned} &\frac{\Delta t}{2} \times [\mathbf{v}_{abc}(t) + \mathbf{v}_{abc}(t - \Delta t) + \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{abc}(t) + \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{abc}(t - \Delta t)] \\ &-\mathbf{L}_{ss}(t - \Delta t) \mathbf{i}_{abc}(t - \Delta t) + \mathbf{L}_{sr}(t - \Delta t) \mathbf{i}_{DQ}(t - \Delta t) + \lambda_{abcm}(t - \Delta t) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (3-6)$$

转子部分公式如下:

$$\begin{aligned} -\mathbf{L}_{rs}(t) \mathbf{i}_{abc}(t) + \mathbf{L}_{rr}(t) \mathbf{i}_{DQ}(t) + \lambda_{DQm} = \\ \left\{ \begin{aligned} &\frac{\Delta t}{2} \times [\mathbf{v}_{DQ}(t) + \mathbf{v}_{DQ}(t - \Delta t) - \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{DQ}(t) - \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{DQ}(t - \Delta t)] \\ &-\mathbf{L}_{rs}(t - \Delta t) \mathbf{i}_{abc}(t - \Delta t) + \mathbf{L}_{rr}(t - \Delta t) \mathbf{i}_{DQ}(t - \Delta t) + \lambda_{DQm} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (3-7)$$

对公式(3-6)进行简化整理可得定子电压电流公式如下:

$$\mathbf{v}_{abc}(t) = -\left(\mathbf{r}_s + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{ss}(t)\right) \mathbf{i}_{abc}(t) + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{sr}(t) \mathbf{i}_{DQ}(t) + \mathbf{e}_{sh}(t) \quad (3-8)$$

其中定子电压历史量 $\mathbf{e}_{sh}(t)$ 为:

$$\mathbf{e}_{sh}(t) = \left[\begin{aligned} &-\left(\mathbf{r}_s - \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{ss}(t - \Delta t)\right) \mathbf{i}_{abc}(t - \Delta t) - \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{sr}(t - \Delta t) \mathbf{i}_{DQ}(t - \Delta t) \\ &-\mathbf{v}_{abc}(t - \Delta t) + \frac{2}{\Delta t} \lambda_{abcm}(t) - \frac{2}{\Delta t} \lambda_{abcm}(t - \Delta t) \end{aligned} \right] \quad (3-9)$$

对公式(3-7)进行简化整理可得转子电流差分方程如下:

$$\mathbf{i}_{DQ}(t) = \left(\mathbf{r}_r + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rr}(t)\right)^{-1} \times \left(\mathbf{v}_{DQ}(t) + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rs}(t) \mathbf{i}_{abc}(t) - \mathbf{e}_{rh}(t)\right) \quad (3-10)$$

其中转子电压历史量 $\mathbf{e}_{rh}(t)$ 为:

$$\mathbf{e}_{rh}(t) = \left(\mathbf{r}_r - \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rr}(t)\right) \mathbf{i}_{DQ}(t - \Delta t) + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rs}(t - \Delta t) \mathbf{i}_{abc}(t - \Delta t) - \mathbf{v}_{DQ}(t - \Delta t) \quad (3-11)$$

将得到的转子电流方程(3-10)代入定子电压电流公式(3-8)可得, 永磁同步发电机 PD 模型的外部网络结构公式如下:

$$\mathbf{v}_{abc}(t) = -\mathbf{r}_{eq}(t)\mathbf{i}_{abc}(t) + \mathbf{e}_h(t) \quad (3-12)$$

公式中的等效阻抗矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 和等效历史电压源 $\mathbf{e}_h(t)$ 公式如下:

$$\mathbf{r}_{eq}(t) = \mathbf{r}_s + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{ss}(t) - \frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{L}_{sr}(t) \left(\mathbf{r}_r + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rr} \right)^{-1} \mathbf{L}_{rs}(t) \quad (3-13)$$

$$\mathbf{e}_h(t) = \mathbf{e}_r(t) + \mathbf{e}_{sh}(t) \quad (3-14)$$

$\mathbf{e}_r(t)$ 为转子部分的当前步长电压源, 与转子部分的历史电压源 $\mathbf{e}_{rh}(t)$ 不一样, 公式如下:

$$\mathbf{e}_r(t) = \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{sr}(t) \times \left(\mathbf{r}_r + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rr} \right)^{-1} \times (\mathbf{v}_{DQ}(t) - \mathbf{e}_{rh}(t)) \quad (3-15)$$

到此为止, 永磁同步发电机的 PD 模型离散小步长仿真实现推导完成, 利用节点电压法计算时, 可以将公式(3-12)转换为诺顿等效的形式, 公式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{abc}(t) &= \mathbf{i}_{hgen}(t) - \mathbf{Y}_{eqgen} \mathbf{v}_{abc}(t) \\ \mathbf{Y}_{eqgen}(t) &= [\mathbf{r}_{eq}(t)]^{-1}, \mathbf{i}_{hgen}(t) = \mathbf{Y}_{eqgen}(t) \mathbf{e}_h(t) \end{aligned} \quad (3-16)$$

发电机元件的导纳矩阵 $\mathbf{Y}_{eqgen}$ 是个满阵, 矩阵中非对角项代表了三相之间的耦合关系, 在物理关系上表示的是定转子绕组间的互感。

3.2 整理阻抗矩阵

由等效阻抗矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 的计算公式(3-13)可知, 等效阻抗矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 由三个部分组成: 定子阻抗矩阵项、定子电感矩阵项以及三重矩阵乘积项。对于永磁同步发电机而言, 阻抗矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 的第二项和第三项皆与转子位置角 θ 有关。

dq 轴磁化阻抗 Z_{md} 和 Z_{mq} 如下所示:

$$Z_{md} = \frac{2}{\Delta t} L_{md}, Z_{mq} = \frac{2}{\Delta t} L_{mq} \quad (3-17)$$

dq 轴阻尼绕组阻抗 Z_{lD} 和 Z_{lQ} 如下所示:

$$Z_{lD} = r_D + \frac{2}{\Delta t} L_{lD}, Z_{lQ} = r_Q + \frac{2}{\Delta t} L_{lQ} \quad (3-18)$$

定义定子漏磁阻抗 Z_{ls} 如下所示:

$$Z_{ls} = r_s + \frac{2}{\Delta t} L_{ls} \quad (3-19)$$

定义 dq 轴离散时间等效阻抗 Z_d 和 Z_q 如下所示：

$$Z_d = (Z_{md}^{-1} + Z_{lD}^{-1})^{-1} = \frac{Z_{md} Z_{lD}}{Z_{lD} + Z_{md}} \quad (3-20)$$

$$Z_q = (Z_{mq}^{-1} + Z_{lQ}^{-1})^{-1} = \frac{Z_{mq} Z_{lQ}}{Z_{lQ} + Z_{mq}} \quad (3-21)$$

3.2.1 整理三重矩阵乘积项

先对等效阻抗矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 的第三项，三重矩阵乘积项进行化简整理。将(3-13)中的三重矩阵乘积项 $\mathbf{L}_{sr}(t)(\mathbf{r}_r + 2/\Delta t \times \mathbf{L}_{rr})^{-1} \mathbf{L}_{rs}(t)$ 分解为 d 轴和 q 轴两部分：

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{sr}(t) \left(\mathbf{r}_r + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rr} \right)^{-1} \mathbf{L}_{rs}(t) &= \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{srd} & \mathbf{L}_{srq} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{r}_{rd} & \\ & \mathbf{r}_{rq} \end{bmatrix} + \frac{2}{\Delta t} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{rrd} & \\ & \mathbf{L}_{rrq} \end{bmatrix} \right)^{-1} \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{rsd} \\ \mathbf{L}_{rsq} \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{L}_{srd} \left(\mathbf{r}_{rd} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rrd} \right)^{-1} \frac{2}{3} \mathbf{L}_{rsd} + \mathbf{L}_{srq} \left(\mathbf{r}_{rq} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rrq} \right)^{-1} \frac{2}{3} \mathbf{L}_{rsq} \end{aligned} \quad (3-22)$$

将公式(3-22)中的 d 轴逆矩阵改写为：

$$\left(\mathbf{r}_{rd} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rrd} \right)^{-1} = \left(r_D + \frac{2}{\Delta t} L_{lD} + \frac{2}{\Delta t} L_{md} \right)^{-1} = (Z_{lD} + Z_{md})^{-1} \quad (3-23)$$

则可以将公式(3-22)中的 d 轴部分写为：

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{srd} \left(\mathbf{r}_{rd} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rrd} \right)^{-1} \frac{2}{3} \mathbf{L}_{rsd} &= \begin{bmatrix} L_{md} \sin \theta \\ L_{md} \sin(\theta - 120^\circ) \\ L_{md} \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} (Z_{lD} + Z_{md})^{-1} \frac{2}{3} \begin{bmatrix} L_{md} \sin \theta \\ L_{md} \sin(\theta - 120^\circ) \\ L_{md} \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix}^T \\ &= \frac{2}{3} \frac{L_{md}^2}{Z_{lD} + Z_{md}} \mathbf{M}_d \end{aligned} \quad (3-24)$$

公式中的 3×3 矩阵 $\mathbf{M}_d$ 如下：

$$\mathbf{M}_d = \begin{bmatrix} \sin \theta \sin \theta & \sin \theta \sin(\theta - 120^\circ) & \sin \theta \sin(\theta + 120^\circ) \\ \sin(\theta - 120^\circ) \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta - 120^\circ) \sin(\theta + 120^\circ) \\ \sin(\theta + 120^\circ) \sin \theta & \sin(\theta + 120^\circ) \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

同理，将公式(3-22)中的 q 轴逆矩阵改写为：

$$\left(\mathbf{r}_{rq} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rrq} \right)^{-1} = \left(r_Q + \frac{2}{\Delta t} L_{lQ} + \frac{2}{\Delta t} L_{mq} \right)^{-1} = (Z_{lQ} + Z_{mq})^{-1} \quad (3-26)$$

可以将公式(3-22)中的 q 轴部分写为：

$$\mathbf{L}_{srq} \left(\mathbf{r}_{rq} + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rrq} \right)^{-1} \frac{2}{3} \mathbf{L}_{rsq} = \begin{bmatrix} L_{mq} \cos \theta \\ L_{mq} \cos(\theta - 120^\circ) \\ L_{mq} \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} (Z_{lQ} + Z_{mq})^{-1} \frac{2}{3} \begin{bmatrix} L_{mq} \cos \theta \\ L_{mq} \cos(\theta - 120^\circ) \\ L_{mq} \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix}^T \quad (3-27)$$

$$= \frac{2}{3} \frac{L_{mq}^2}{Z_{lQ} + Z_{mq}} \mathbf{M}_q$$

公式中的 3×3 矩阵 $\mathbf{M}_q$ 如下:

$$\mathbf{M}_q = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \theta & \cos \theta \cos(\theta - 120^\circ) & \cos \theta \cos(\theta + 120^\circ) \\ \cos(\theta - 120^\circ) \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) \cos \theta & \cos(\theta + 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

因此等效电阻矩阵中的三重矩阵乘积项即为 d 轴公式(3-24)和 q 轴公式(3-27)两个矩阵的相加, 如下所示:

$$\mathbf{L}_{sr}(t) \left(\mathbf{r}_r + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{L}_{rr} \right)^{-1} \mathbf{L}_{rs}(t) = \left(+ \frac{2}{3} \frac{L_{md}^2}{Z_{lD} + Z_{md}} \mathbf{M}_d + \frac{2}{3} \frac{L_{mq}^2}{Z_{lQ} + Z_{mq}} \mathbf{M}_q \right) \quad (3-29)$$

等效电阻矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 中的定子阻抗矩阵项 $\mathbf{r}_s$ 和定子电感矩阵项 $2/\Delta t \times \mathbf{L}_{ss}(t)$ 的公式在上一章发电机建模部分已经给出, 将定子阻抗矩阵项、定子电感矩阵项以及三重矩阵乘积项公式都代入等效电阻矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 中可得公式如下:

$$\mathbf{r}_{eq}(t) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} r_s \\ r_s \\ r_s \end{bmatrix} + \frac{2}{\Delta t} \begin{bmatrix} L_k + L_A - L_B \cos 2\theta & -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2(\theta - 60^\circ) & -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2(\theta + 60^\circ) \\ -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2(\theta - 60^\circ) & L_k + L_A - L_B \cos 2(\theta - 120^\circ) & -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2(\theta + 180^\circ) \\ -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2(\theta + 60^\circ) & -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2(\theta + 180^\circ) & L_k + L_A - L_B \cos 2(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \right. \\ \left. - \frac{4}{\Delta t^2} \left(\begin{bmatrix} + \frac{2}{3} \frac{L_{md}^2}{Z_{lD} + Z_{md}} \begin{bmatrix} \sin \theta \sin \theta & \sin \theta \sin(\theta - 120^\circ) & \sin \theta \sin(\theta + 120^\circ) \\ \sin(\theta - 120^\circ) \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta - 120^\circ) \sin(\theta + 120^\circ) \\ \sin(\theta + 120^\circ) \sin \theta & \sin(\theta + 120^\circ) \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \\ + \frac{2}{3} \frac{L_{mq}^2}{Z_{lQ} + Z_{mq}} \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \theta & \cos \theta \cos(\theta - 120^\circ) & \cos \theta \cos(\theta + 120^\circ) \\ \cos(\theta - 120^\circ) \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) \cos \theta & \cos(\theta + 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \right\}$$

$$L_A = \frac{L_{md} + L_{mq}}{3}, L_B = \frac{L_{md} - L_{mq}}{3} \quad (3-30)$$

3.2.2 计算矩阵对角线项

上一节已经整理出了等效阻抗矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 的计算公式(3-30), 这一小节的主要内容是对阻抗矩阵对角线上的 3 个元素进行化简。三个元素分别是 $r_{11}(t)$ 、 $r_{22}(t)$

和 $r_{33}(t)$ 。

先写出 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 对角线上的第一个元素 $r_{11}(t)$ 公式如下：

$$r_{11}(t) = \left[r_s + \frac{2}{\Delta t} (L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta) - \frac{4}{\Delta t^2} \left(\begin{aligned} &+ \frac{2}{3} \frac{L_{md}^2}{Z_{ID} + Z_{md}} \sin \theta \sin \theta \\ &+ \frac{2}{3} \frac{L_{mq}^2}{Z_{IQ} + Z_{mq}} \cos \theta \cos \theta \end{aligned} \right) \right] \quad (3-31)$$

对公式(3-31)应用三角函数和差化积公式，可得：

$$r_{11}(t) = \left[r_s + \frac{2}{\Delta t} (L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta) - \frac{4}{\Delta t^2} \left(\begin{aligned} &+ \frac{2}{3} \frac{L_{md}^2}{Z_{ID} + Z_{md}} \frac{1 - \cos 2\theta}{2} \\ &+ \frac{2}{3} \frac{L_{mq}^2}{Z_{IQ} + Z_{mq}} \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \end{aligned} \right) \right] \quad (3-32)$$

可以将公式(3-32)中有发电机转子位置角 θ 的部分与常量部分整理出来，整理出时变部分 $r_{11c}(t)$ 与时不变部分 r_{110} 。整理出元素 $r_{11}(t)$ 时变部分 $r_{11c}(t)$ 的公式如下所示：

$$r_{11c}(t) = \left[\frac{2}{\Delta t} (-L_B) + \left(-\frac{4}{\Delta t^2} \frac{2}{3} \frac{L_{md}^2}{Z_{ID} + Z_{md}} \frac{-1}{2} - \frac{4}{\Delta t^2} \frac{2}{3} \frac{L_{mq}^2}{Z_{IQ} + Z_{mq}} \frac{1}{2} \right) \right] \cos 2\theta \quad (3-33)$$

代入公式可以将时变部分 $r_{11c}(t)$ 整理成：

$$r_{11c}(t) = -\frac{1}{3} \left(Z_{md} - Z_{mq} - \frac{Z_{md}^2}{Z_{ID} + Z_{md}} + \frac{Z_{mq}^2}{Z_{IQ} + Z_{mq}} \right) \cos 2\theta \quad (3-34)$$

同样可以整理出元素 $r_{11}(t)$ 时不变部分 r_{110} 的公式如下所示：

$$r_{110} = r_s + \frac{2}{\Delta t} L_{ls} + \frac{2}{\Delta t} L_A - \frac{4}{\Delta t^2} \frac{1}{3} \frac{L_{md}^2}{Z_{ID} + Z_{md}} - \frac{4}{\Delta t^2} \frac{1}{3} \frac{L_{mq}^2}{Z_{IQ} + Z_{mq}} \quad (3-35)$$

代入公式可以将时不变部分 r_{110} 整理成：

$$r_{110} = r_s + \frac{2}{\Delta t} L_{ls} + \frac{1}{3} \left(Z_{md} + Z_{mq} - \frac{Z_{md}^2}{Z_{ID} + Z_{md}} - \frac{Z_{mq}^2}{Z_{IQ} + Z_{mq}} \right) \quad (3-36)$$

最后将 $r_{11}(t)$ 整理成时变部分 $r_{11c}(t)$ 加时不变部分 r_{110} 的形式，公式如下所示：

$$r_{11}(t) = r_{11c}(t) + r_{110} = \frac{1}{3} (Z_q - Z_d) \cos 2\theta + Z_{ls} + \frac{1}{3} (Z_d + Z_q) \quad (3-37)$$

同理，写出 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 对角线上的第二个元素 $r_{22}(t)$ 公式如下：

$$r_{22}(t) = \left\{ \begin{aligned} & r_s + \frac{2}{\Delta t} [L_{ls} + L_A - L_B \cos 2(\theta - 120^\circ)] \\ & - \frac{4}{\Delta t^2} \left[\begin{aligned} & + \frac{2}{3} \frac{L_{md}^2}{Z_{lD} + Z_{md}} \sin(\theta - 120^\circ) \sin(\theta - 120^\circ) \\ & + \frac{2}{3} \frac{L_{mq}^2}{Z_{lQ} + Z_{mq}} \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3-38)$$

可以将其整理成时变部分 $r_{22c}(t)$ 加时不变部分 r_{220} 的形式，公式如下所示：

$$r_{22}(t) = r_{22c}(t) + r_{220} = \frac{1}{3} (Z_q - Z_d) \cos 2(\theta - 120^\circ) + Z_{ls} + \frac{1}{3} (Z_d + Z_q) \quad (3-39)$$

同理，写出 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 对角线上的第三个元素 $r_{33}(t)$ 公式如下：

$$r_{33}(t) = \left\{ \begin{aligned} & r_s + \frac{2}{\Delta t} [L_{ls} + L_A - L_B \cos 2(\theta + 120^\circ)] \\ & - \frac{4}{\Delta t^2} \left[\begin{aligned} & + \frac{2}{3} \frac{L_{md}^2}{Z_{lD} + Z_{md}} \sin(\theta + 120^\circ) \sin(\theta + 120^\circ) \\ & + \frac{2}{3} \frac{L_{mq}^2}{Z_{lQ} + Z_{mq}} \cos(\theta + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3-40)$$

可以将其整理成时变部分 $r_{33c}(t)$ 加时不变部分 r_{330} 的形式，公式如下所示：

$$r_{33}(t) = r_{33c}(t) + r_{330} = \frac{1}{3} (Z_q - Z_d) \cos 2(\theta + 120^\circ) + Z_{ls} + \frac{1}{3} (Z_d + Z_q) \quad (3-41)$$

这一小节化简了发电机模型阻抗矩阵对角线项的三个元素 $r_{11}(t)$ 、 $r_{22}(t)$ 和 $r_{33}(t)$ ，将其整理为时变部分加时不变部分的形式。

3.2.3 计算矩阵非对角线项

上一小节整理了发电机模型等效阻抗矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 对角线项的元素，这一小节用同样的思路整理阻抗矩阵非对角线项。非对角线项一共有 6 个元素，分别是 $r_{12}(t)$ 、 $r_{21}(t)$ 、 $r_{13}(t)$ 、 $r_{31}(t)$ 、 $r_{23}(t)$ 和 $r_{32}(t)$ 。

写出 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 非对角线上的元素 $r_{12}(t)$ 公式如下：

$$r_{12}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{\Delta t} \left[-\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2(\theta - 60^\circ) \right] \\ -\frac{4}{\Delta t^2} \left[\begin{array}{l} +\frac{2}{3} \frac{L_{md}^2}{Z_{ID} + Z_{md}} \sin \theta \sin(\theta - 120^\circ) \\ +\frac{2}{3} \frac{L_{mq}^2}{Z_{IQ} + Z_{mq}} \cos \theta \cos(\theta - 120^\circ) \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (3-42)$$

可以将其整理成时变部分 $r_{12c}(t)$ 加时不变部分 r_{120} 的形式，公式如下所示：

$$r_{12}(t) = r_{12c}(t) + r_{120} = \frac{1}{3} (Z_q - Z_d) \cos 2(\theta - 60^\circ) - \frac{1}{6} (Z_q + Z_d) \quad (3-43)$$

公式(3-30)中 $r_{12}(t) = r_{21}(t)$ ，因此化简整理出的时变部分 $r_{21c}(t) = r_{12c}(t)$ ，时不变部分 $r_{210} = r_{120}$ 。

同理，可以整理出其余四个非对角线元素的时变项和时不变项公式。最后将 9 个元素的时变部分和时不变部分汇总，可以写出阻抗矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 的公式如下：

$$\mathbf{r}_{eq}(t) = \mathbf{r}_0 + \frac{1}{3} (Z_q - Z_d) \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \cos 2(\theta - 60^\circ) & \cos 2(\theta + 60^\circ) \\ \cos 2(\theta - 60^\circ) & \cos 2(\theta - 120^\circ) & \cos 2\theta \\ \cos 2(\theta + 60^\circ) & \cos 2\theta & \cos 2(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3-44)$$

其中 $\mathbf{r}_0$ 为：

$$\mathbf{r}_0 = \begin{bmatrix} Z_{ls} + \frac{1}{3} (Z_d + Z_q) & -\frac{1}{6} (Z_d + Z_q) & -\frac{1}{6} (Z_d + Z_q) \\ -\frac{1}{6} (Z_d + Z_q) & Z_{ls} + \frac{1}{3} (Z_d + Z_q) & -\frac{1}{6} (Z_d + Z_q) \\ -\frac{1}{6} (Z_d + Z_q) & -\frac{1}{6} (Z_d + Z_q) & Z_{ls} + \frac{1}{3} (Z_d + Z_q) \end{bmatrix} \quad (3-45)$$

这一小节将阻抗矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 中的 9 个元素按照是否有发电机转子位置角 θ 进行了整理化简，将整个矩阵分为了时变部分与时不变部分，通过公式(3-44)可以看出，时变部分矩阵前的系数为 $(Z_q - Z_d)$ 。

3.3 虚拟阻抗补偿

对上一小节整理出的阻抗矩阵进行分析，可以看出，发电机阻抗矩阵由时不变部分和时变部分组成，时变部分公式为：

$$\mathbf{r}_c(t) = \frac{1}{3} (Z_q - Z_d) \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \cos 2(\theta - 60^\circ) & \cos 2(\theta + 60^\circ) \\ \cos 2(\theta - 60^\circ) & \cos 2(\theta - 120^\circ) & \cos 2\theta \\ \cos 2(\theta + 60^\circ) & \cos 2\theta & \cos 2(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3-46)$$

如公式(3-46)所示，永磁同步发电机阻抗矩阵 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 时变的原因是公式(3-46)

时变量前面的系数(Z_q-Z_d)非零。 dq 轴不相等的等效阻抗使得发电机三相端口内部阻抗矩阵时变。

为了能够补偿发电机阻抗矩阵的动态变化,考虑在计算中添加虚拟阻抗的方式;同时考虑到永磁同步发电机往往是 d 轴阻尼绕组阻抗小于 q 轴,因此在 q 轴补偿虚拟阻抗 Z_{lQ2} 。通过给定虚拟阻抗 Z_{lQ2} 的参数,令 dq 轴等效阻抗 Z_d 和 Z_q 相等,则 $\mathbf{r}_{eq}(t)$ 中的时变量系数为零,可以消除阻抗矩阵的时变部分。补偿后发电机模型相比原本发电机模型,机器参数相似,阻抗矩阵恒定,阻尼特性略有不同。

虚拟阻抗 Z_{lQ2} 由电阻与电抗组成,定义电阻为 r_{Q2} ,电抗为 L_{lQ2} ,则公式如下:

$$Z_{lQ2} = r_{Q2} + \frac{2}{\Delta t} L_{lQ2} \quad (3-47)$$

用 Z_{q^*} 来表示补偿后发电机模型的 q 轴等效离散次暂态阻抗,则 Z_{q^*} 满足如下公式:

$$Z_{q^*} = Z_d = \left((Z_{mq})^{-1} + (Z_{lQ})^{-1} + (Z_{lQ2})^{-1} \right)^{-1} \quad (3-48)$$

在模型中,离散次暂态阻抗仅取决于发电机的机器参数和离散时间步长。补偿后的 d 轴 q 轴阻抗相同,满足 $Z_{q^*} = Z_d$ 。

添加的虚拟阻抗 $Q2$ 通过将极点添加到相应的传递函数来改变 q 轴阻抗,影响发电机阻尼特性^[69]。并且通过该方法补偿导致的误差集中在较高频率处,在较低频率处二者阻尼特性相似^[70]。

为了使误差限制在较高的频率,添加的极点时间常数应放置在比用户指定频率 f_r 高约十倍的位置,即:

$$\tau_{Q2} \leq \frac{1}{2\pi \times 10 f_r} \quad (3-49)$$

此外由文献[69]中 Ch7 的公式可知,相应的时间常数也可以计算为:

$$\tau_{Q2} = \frac{L_{lQ2}}{r_{Q2}} + \frac{1}{r_{Q2}} \left((L_{mq})^{-1} + (L_{lQ})^{-1} \right)^{-1} \quad (3-50)$$

分析公式(3-49)和(3-50)可知,通过改变补偿阻抗的电抗 L_{lQ2} ,可以改变误差的频率范围,将补偿虚拟阻抗的误差限制在较高频率。

将发电机方程(3-12)改写为导纳方程形式即可得到同步发电机的恒导纳模型如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{abc}(t) &= \mathbf{i}_{hgen}(t) - \mathbf{Y}_{eqgen} \mathbf{v}_{abc}(t) \\ \mathbf{Y}_{eqgen}(t) &= [\mathbf{r}_0(t)]^{-1}, \mathbf{i}_{hgen}(t) = \mathbf{Y}_{eqgen}(t) \mathbf{e}_h(t) \end{aligned} \quad (3-51)$$

通过在 q 轴补偿虚拟阻抗的方法,可以将发电机内部阻抗矩阵时变项前的系数置零,令发电机阻抗矩阵时不变,则整个网络的节点导纳矩阵恒定。

3.4 补偿阻抗的影响

上一小节已经通过在 q 轴添加虚拟阻抗的方式,将发电机内部的阻抗矩阵恒定,这一小节主要的目的是分析添加虚拟阻抗对发电机模型的影响。

在转子上添加虚拟阻抗对于模型的影响可以等效为在 Q 轴添加一个阻尼绕组。转子阻尼绕组对电磁暂态的影响可以通过后文的仿真实验证明,对机电暂态的影响则大部分是通过转子运动方程中的阻尼系数体现^[71]。机电暂态过程往往以秒为单位,在电磁暂态的时间尺度下补偿阻抗对机电暂态的影响可以忽略不计。

可以从能量角度分析添加虚拟阻抗的影响。在发电机稳态或小扰动运行的过程中,转子侧阻尼绕组电流一直维持一个相当小的参数。本文第四章算例仿真验证部分的永磁同步电机稳态定转子电流如图 3-1 所示。

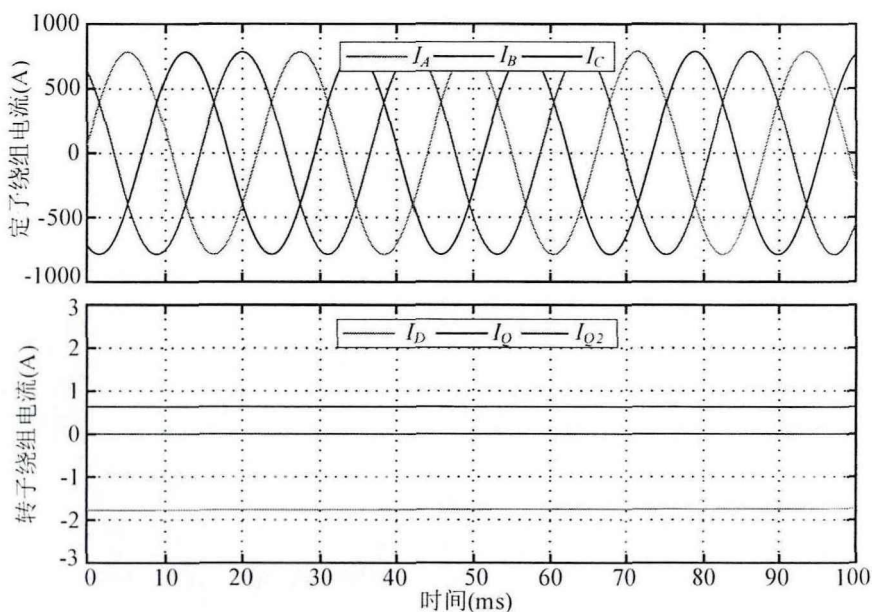


图 3-1 发电机稳态定转子电流

阻尼绕组电流 I_D 和 I_Q 为定子电流峰值的 0.5% 左右,流过补偿阻抗的电流为 I_{Q2} , I_{Q2} 为定子电流峰值的 0.1% 左右。补偿阻抗引起的额外能量损失在 $10^{-6} pu$ 数量级,对发电机模型的影响极小。

此外,特征根分析也可以用来计算系统的动态性能,验证虚拟阻抗对系统的影响。首先将发电机模型的电压磁链方程进行整理,表示成状态空间表达式的形式,状态变量为各个绕组的电流 i 。状态空间表达式如下所示:

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{DQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} \\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\lambda_{abcm}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{DQm}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{33} & \mathbf{B}_{34} \\ \mathbf{B}_{43} & \mathbf{B}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abc} \\ \mathbf{v}_{DQ} \end{bmatrix} \quad (3-52)$$

公式中下标 abc 代表 abc 轴的参数, DQ 代表 DQ 轴的参数。代入发电机公式,可整理出状态空间系统矩阵 A 的四个子矩阵方程分别为:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{11} &= (\mathbf{L}_{ss} - \mathbf{L}_{sr}\mathbf{L}_{rr}^{-1}\mathbf{L}_{rs})^{-1} \left(-\mathbf{r}_s - \frac{d\mathbf{L}_{ss}}{dt} + \mathbf{L}_{sr}\mathbf{L}_{rr}^{-1} \frac{d\mathbf{L}_{rs}}{dt} \right) \\ \mathbf{A}_{12} &= (\mathbf{L}_{ss} - \mathbf{L}_{sr}\mathbf{L}_{rr}^{-1}\mathbf{L}_{rs})^{-1} \left(-\mathbf{L}_{sr}\mathbf{L}_{rr}^{-1}\mathbf{r}_r + \frac{d\mathbf{L}_{sr}}{dt} - \mathbf{L}_{sr}\mathbf{L}_{rr}^{-1} \frac{d\mathbf{L}_{rr}}{dt} \right) \\ \mathbf{A}_{21} &= (\mathbf{L}_{rr} - \mathbf{L}_{rs}\mathbf{L}_{ss}^{-1}\mathbf{L}_{sr})^{-1} \left(-\mathbf{L}_{rs}\mathbf{L}_{ss}^{-1}\mathbf{r}_s - \mathbf{L}_{rs}\mathbf{L}_{ss}^{-1} \frac{d\mathbf{L}_{ss}}{dt} + \frac{d\mathbf{L}_{rs}}{dt} \right) \\ \mathbf{A}_{22} &= (\mathbf{L}_{rr} - \mathbf{L}_{rs}\mathbf{L}_{ss}^{-1}\mathbf{L}_{sr})^{-1} \left(-\mathbf{r}_r + \mathbf{L}_{rs}\mathbf{L}_{ss}^{-1} \frac{d\mathbf{L}_{sr}}{dt} - \frac{d\mathbf{L}_{rr}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (3-53)$$

公式(3-52)中的输入矩阵 B 代表了输入对状态向量的影响,与系统性能无关,在此只给出具体的参数,不做分析。

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{11} &= 1, \mathbf{B}_{12} = -\mathbf{L}_{sr}\mathbf{L}_{rr}^{-1}, \mathbf{B}_{21} = \mathbf{L}_{rs}\mathbf{L}_{ss}^{-1}, \mathbf{B}_{22} = -1, \\ \mathbf{B}_{33} &= -1, \mathbf{B}_{34} = \mathbf{L}_{sr}\mathbf{L}_{rr}^{-1}, \mathbf{B}_{43} = -\mathbf{L}_{rs}\mathbf{L}_{ss}^{-1}, \mathbf{B}_{44} = 1 \end{aligned} \quad (3-54)$$

补偿虚拟阻抗之后在转子侧相当于多了一个绕组,系统矩阵 A 由 5×5 增加到了 6×6 。带入第四节中给出的永磁同步电机参数可计算出系统矩阵 A 的特征根。如表 3-1 所示:

表 3-1 系统矩阵 A 特征根

模型	PD模型	恒导纳模型
特征根 1	0.33434	0.33437
特征根 2	-1.081	-1.081
特征根 3	-8.803	-8.803
特征根 4	-75.94	-75.94
特征根 5	-254.72	-254.68
特征根 6	无	-7831.1

系统矩阵特征根代表了系统在 S 域的极点,靠近虚轴的主导极点决定了系统

的动态性能，换言之系统矩阵 A 最靠近虚轴的特征根决定了系统的动态性能。比主导极点实部大 3-6 倍以上的其他零极点影响均可忽略^[72]。

添加虚拟阻抗仅在离虚轴非常远的位置添加了一个闭环极点，该闭环极点位置为 $(-7831.1, 0)$ ，对其他极点的位置几乎没有影响。主导极点的实部几乎没有变化，因此添加补偿对系统的影响非常小，可以忽略不记。

3.5 本章小结

本章节提出了一种基于虚拟阻抗补偿的永磁同步发电机恒导纳建模方法。

上一章节列写出了完整的永磁直驱风机导纳矩阵，针对导纳矩阵时变的问题，详细推导了发电机模型 EMTP 算法的公式，将发电机内阻抗矩阵根据时变与时不变分成两个部分，分别进行整理和化简。

对发电机阻抗矩阵时变部分进行分析，发现发电机时变的根本原因是 dq 轴内部等效阻抗不相等；为了能够补偿发电机阻抗矩阵的动态变化，在发电机计算中添加虚拟阻抗，令 dq 轴内部等效阻抗相等、阻抗矩阵恒定。则在小步长仿真中不需要每个步长进行一次导纳矩阵的求逆，只需要在仿真开始之前预处理即可，可以节省大量板卡计算资源，提升仿真效率。

随后分别从能量角度和特征根计算的角度对添加的虚拟阻抗进行分析，证明添加的虚拟阻抗对模型动态性能的影响极小，具体的仿真验证将在第四章做详细分析。

第4章 算例仿真与验证

前面的第二章节在 FPGA 环境下搭建了永磁直驱发电机的数学模型，按照常规方法搭建出的模型节点导纳矩阵时变。第三章经过对导纳矩阵的分析，发现时变的来源是发电机部分的导纳矩阵存在受转子位置角影响的动态变化量。于是通过在转子上补偿虚拟阻抗，抵消了导纳矩阵的动态变化，将整个发电机导纳矩阵恒定下来，提出了一种基于虚拟阻抗补偿的永磁同步发电机恒导纳建模方法。

本章节主要通过仿真验证所提恒导纳模型的准确性，以及基于 FPGA 搭建的永磁同步发电机模型的准确性。

4.1 系统参数配置

整体永磁直驱风机结构如图 2-1 所示。设置实验仿真步长为 $10\mu\text{s}$ ，风机系统元件参数如表 4-1 所示。

表 4-1 风机系统元件参数

元件	参数	数值	参数	数值
风力机	空气密度	1.225kg/m^3	叶片半径	50.0m
	额定转速	13rad/min	额定风速	10.0m/s
	切入风速	3.0m/s	切出风速	25.0m/s
发电机	额定容量	2MW	额定机械转矩	$84.88\text{kN}\cdot\text{m}$
	额定电压	690V	额定转子磁链	2.11Wb(RMS)
	额定频率	30Hz	定子绕组电阻	0.0017pu
	极对数	8	定子绕组漏抗	0.0364pu
	d 轴同步电抗	0.55pu	q 轴同步电抗	1.11pu
	D 轴绕组电阻	0.055pu	D 轴绕组电抗	0.62pu
	Q 轴绕组电阻	0.183pu	Q 轴绕组电抗	1.175pu
换流器	阻尼系数	0.9	机侧开关电流	2.0kA
	开关电压	1.45kV	网侧开关电流	180A
LC 部分	直流侧电容	15mF	机侧平波电抗	0.75mH
	网侧电容滤波	$4.93\mu\text{F}$	网侧电感滤波	0.335mH

为了验证本文所提恒导纳模型的准确性，以及基于 FPGA 搭建的永磁同步发电机模型的准确性，分别在 MATLAB 平台上用常规发电机模型和恒导纳模型、

在FPGA平台上用恒导纳模型,搭建了发电机单机接负载和永磁直驱发电机完整机组接电网的仿真模型,并分别对其稳态、小扰动、大扰动等工况进行了仿真实验。

本次FPGA仿真实验采用的板卡是Xilinx公司开发的Virtex™ 7系列XC7VX485T-2FFG1761C芯片以及配套开发板,产品编号为EK-V7-VC707-G。该开发板拥有极为强大的版上功能,综合运行的频率为400MHz,拥有高达1600Mbps的DDR3 SODIM高级存储接口,芯片内集成了48万个逻辑单元,能满足永磁直驱风机暂态仿真对处理器算力的要求。

将永磁直驱发电机完整模型在FPGA平台下搭建完成后,运行RTL实现和综合,板卡生成的电路原理图如图4-1所示。

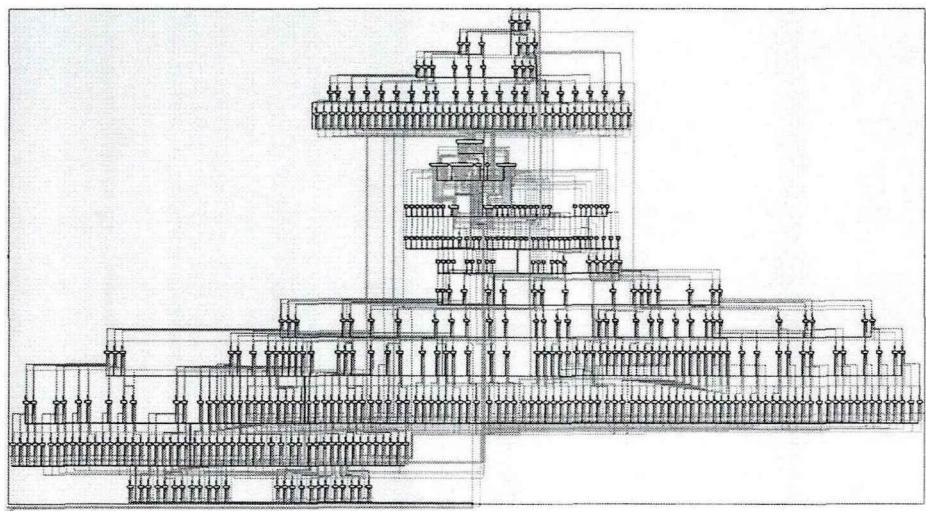


图 4-1 程序电路原理图

同时,Vivado平台也会给出仿真程序对板卡的资源消耗量,如图4-2所示。需要注意的是,资源占用量是Verilog程序在综合实现过程中软件统计的消耗量,可以作为一个参考,并不能代表真实的情况。

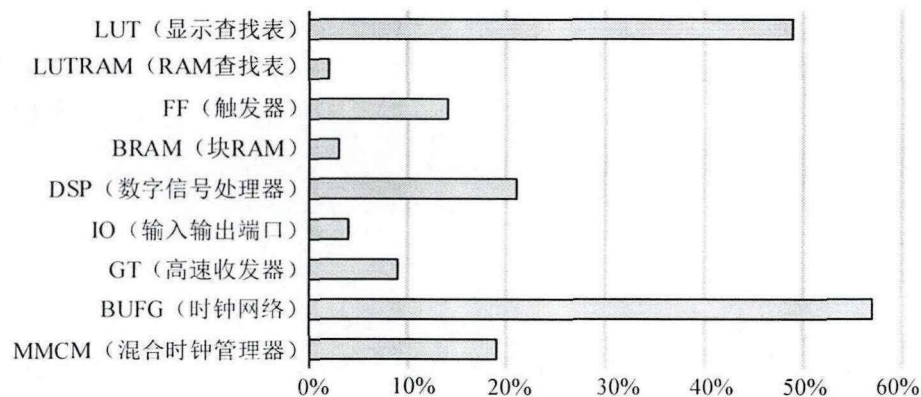


图 4-2 板卡资源消耗量

从图中可以看出，在模型搭建过程中对计算过程进行优化后，完整模型的资源消耗量已经降低到一个比较低的程度了，对 FPGA 板卡来说计算资源压力不大。

4.2 发电机单机仿真结果

发电机单机仿真模型中不存在换流器及控制部分，只有风力机和发电机子系统，发电机机端接阻感性负载。需要注意的是，真实的风场建设过程中并不会存在发电机机端直接连接负载的情况，所有的永磁直驱风机都需要经过换流器整流逆变后再接入电网，并且绝大多数都是全功率换流器。此处进行单机仿真目的是排除换流器和控制部分的影响，研究所提出的恒导纳发电机模型的正确性。

根据模型受到的扰动大小将仿真进行分类，分别进行了稳态和小扰动的仿真以及对称故障和不对称故障的仿真，分别用于研究模型的静态稳定性和暂态稳定性。

4.2.1 静态稳定仿真

仿真实验的切负荷扰动为机端负荷参数突然减至一半，扰动发生时间为 0.02s，持续时间为 0.1s。其中稳态正常运行仿真波形如图 4-3 所示，突然单机切负荷波形如图 4-4 所示。图例中的恒导纳(F)，表示是基于 FPGA 平台搭建的发电机恒导纳模型仿真数据；恒导纳(Mat)和 PD(Mat)则分别代表了基于 MATLAB 平台搭建的恒导纳模型和 PD 模型仿真数据。

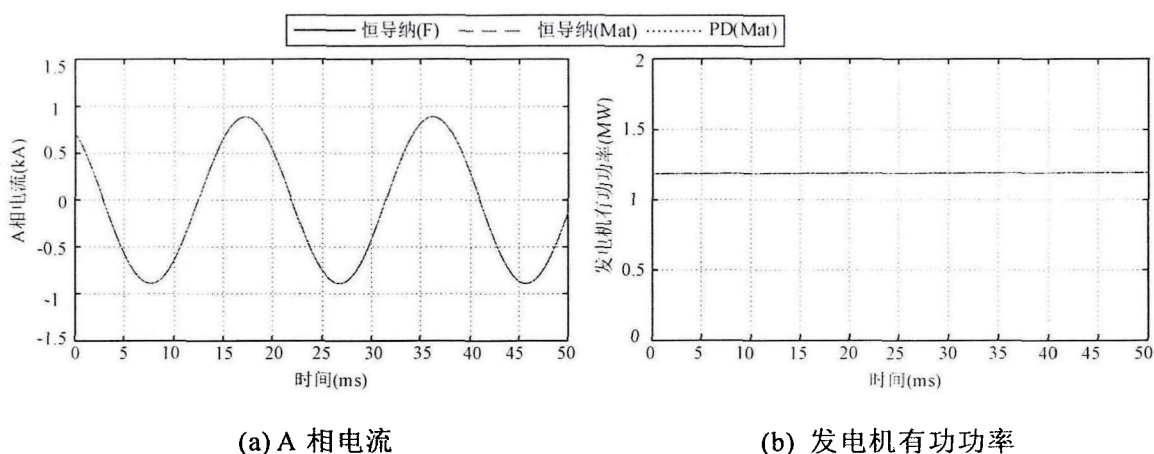


图 4-3 单机接负载稳态仿真曲线

上图 4-3 为单机接负载情况下稳态的运行仿真图，4-3(a)和 4-3(b)分别为稳态时的发电机输出端电流和发电机输出的有功功率。下图 4-4 为发生小扰动，负载波动情况下的仿真波形图。

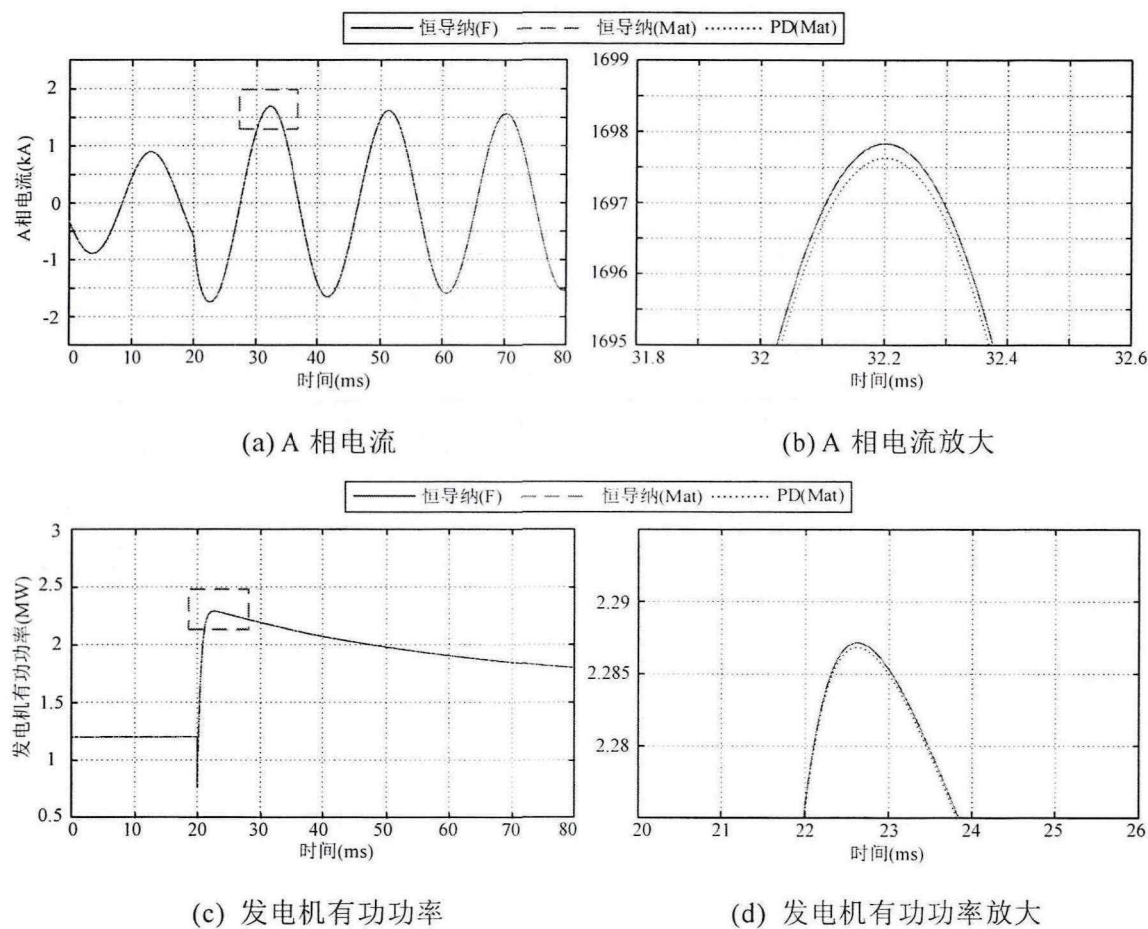


图 4-4 单机接负载小扰动仿真曲线

图 4-4(a)和(c)分别为发电机突然切负荷情况下机端 A 相电流和发电机有功功率，图 4-4(b)和(d)分别为图 4-4(a)和(c)中红框放大。

由于没有换流器的机侧控制，发电机输出功率受到负荷影响，无法保持在额定情况下运行。在切负荷时输出功率会有变化，最后稳定在下一个平衡点下。由曲线可以看出在稳态和小扰动时采用虚拟阻抗补偿的发电机模型仿真精度较高，与未经过近似的精确模型仿真结果拟合程度较高。

4.2.2 暂态稳定仿真

仿真实验的对称故障设置为机端三相短路接地和 A 相单相短路接地故障。故障发生时间为 0.01s，故障持续时间为 0.1s。其中单相短路接地运行仿真波形如图 4-5 所示，三相短路接地波形如图 4-6 所示。

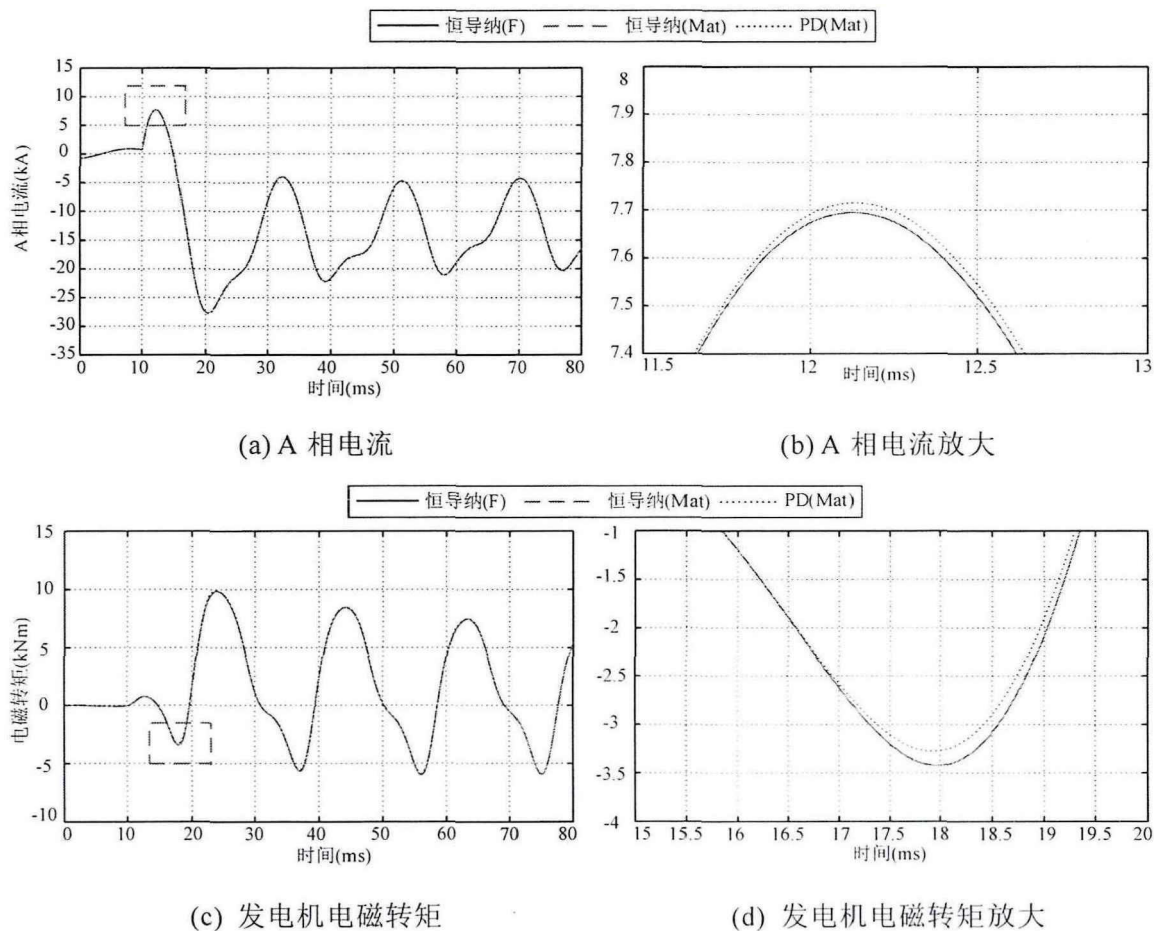
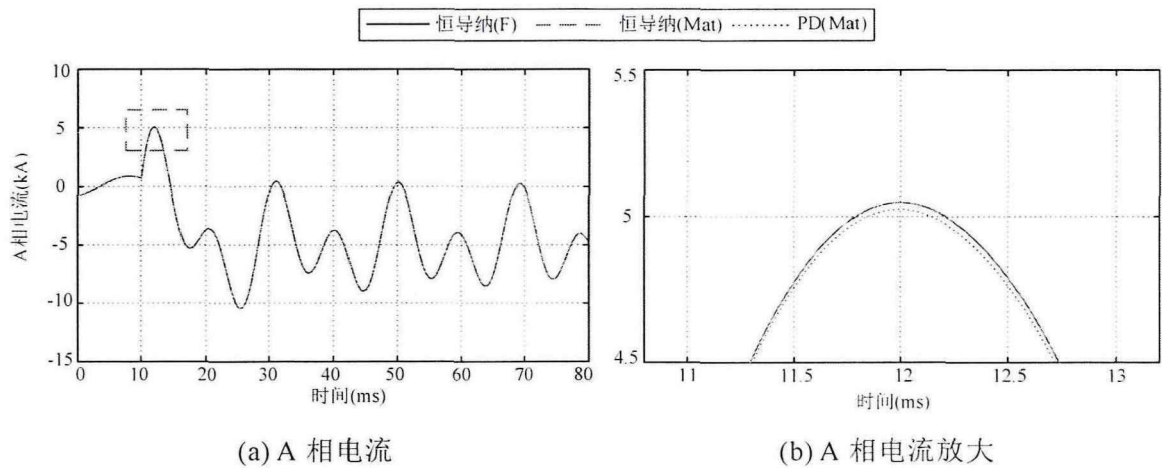


图 4-5 单机接负载单相短路接地仿真曲线

上图 4-5 为单机接负载情况下单相短路接地的运行仿真图，4-5(a)和(c)分别为不对称故障情况下机端 A 相电流和发电机电磁转矩，图 4-5(b)和(d)分别为图 4-5(a)和(c)中红框放大。下图 4-6 为发生三相短路接地，对称故障情况下的仿真波形图。



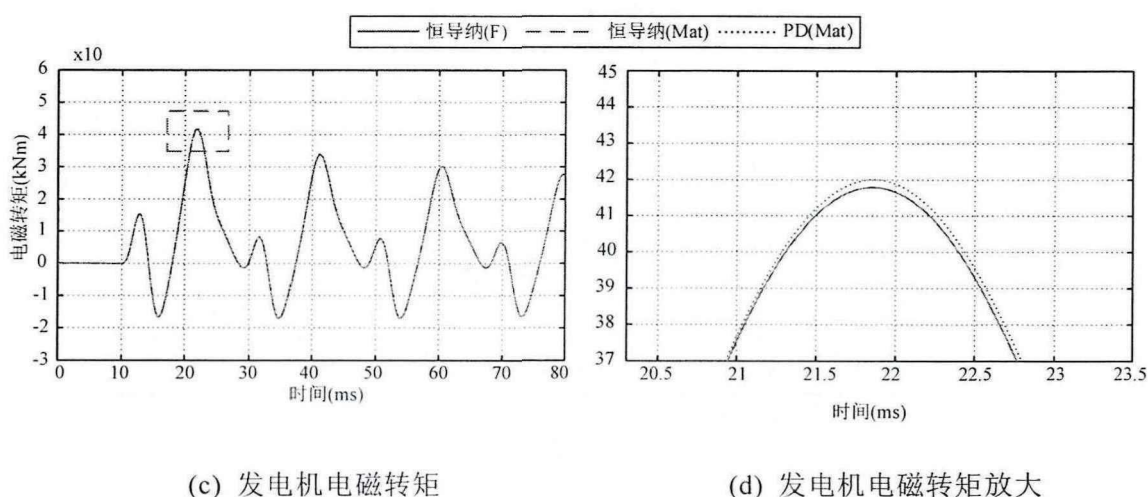


图 4-6 单机接负载三相短路接地仿真曲线

图 4-6(a)和(c)分别为发电机三相短路接地情况下机端 A 相电流和发电机电磁转矩，图 4-6(b)和(d)分别为图 4-6(a)和(c)中红框放大。

由仿真曲线中可以看出，在单相短路接地和三相短路接地的故障中，采用虚拟阻抗补偿的发电机模型仍然有较高的仿真精度。与 PD 模型等未经过计算近似的精确仿真模型相比，误差不超过 1%的数量级。

4.3 完整发电机仿真结果

经过上一小节对单机模型的仿真，已经可以确定基于虚拟阻抗补偿的发电机恒导纳模型在仿真时的精确度，该小节进行完整模型的仿真。

完整的发电机模型包括真实永磁同步发电机所有的仿真子系统，包括风力机、发电机、换流器、换流器控制、平波电抗等部分，设定仿真过程中风速始终为额定风速 10m/s（小扰动仿真过程除外），机端连接无穷大电网。该章节主要目的是通过仿真研究所搭建的 FPGA 风力发电机模型的正确性。

与上一小节一样，该小节同样进行了稳态和小扰动的仿真以及对称故障和不对称故障的仿真，分别用于研究模型的静态稳定性和暂态稳定性，此外由于该模型有换流器控制的介入，还进行了控制未启动和控制刚启动的完整模型仿真。仿真的对象有三个，分别为基于 FPGA 平台用恒导纳发电机搭建的完整永磁直驱模型、基于 MATLAB 平台用恒导纳发电机搭建的完整永磁直驱模型以及基于 MATLAB 平台用 PD 发电机搭建的完整永磁直驱模型。

4.3.1 换流器控制仿真

该小节测试了发电机经过换流器并网的完整 PMSG 机组在换流器控制未投入和换流器控制启动时的仿真波形。换流器控制在 0.01s 投入。其中控制未投入

的仿真波形如图 4-7 所示，控制刚投入的仿真波形如图 4-8 所示。

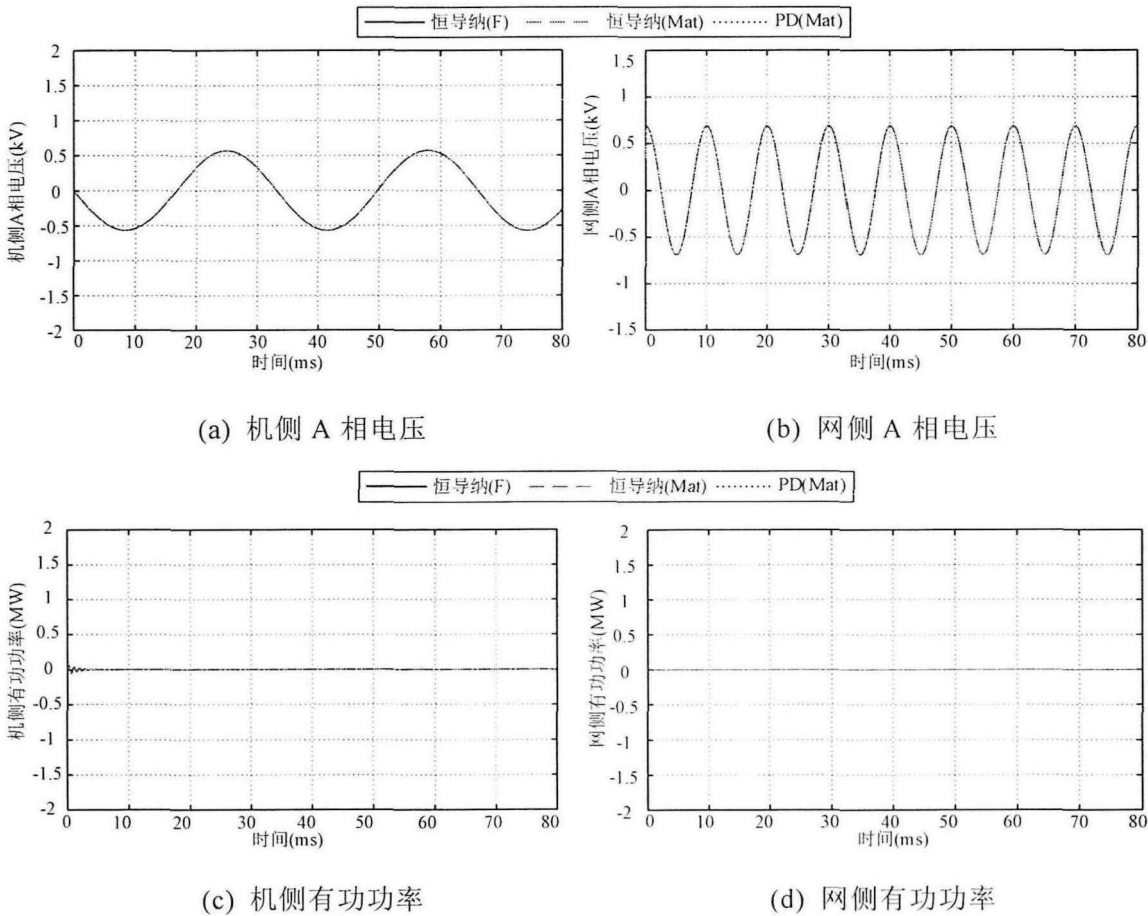
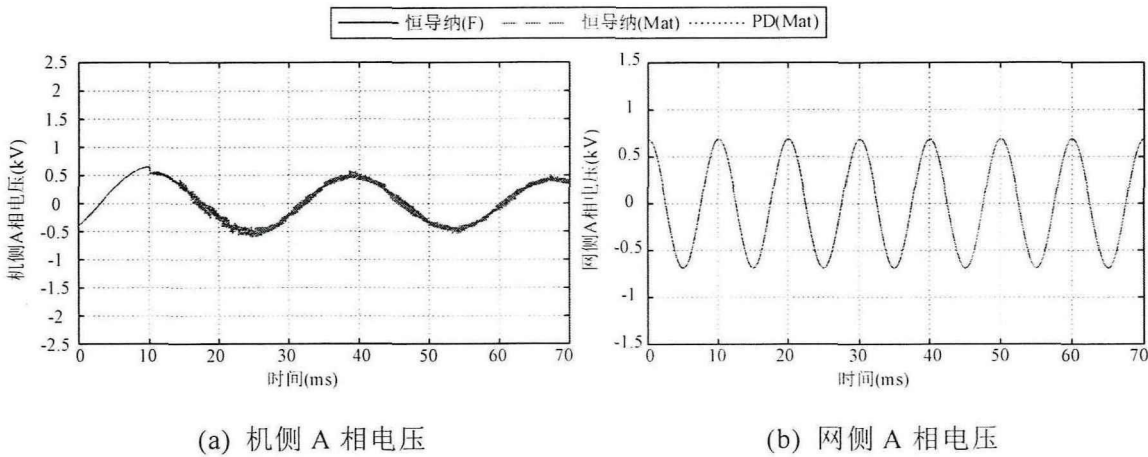


图 4-7 完整模型控制未投入仿真曲线

上图 4-7 为完整模型换流器控制未投入情况下的运行仿真图，图 4-7(a)和 4-7(b)分别为机侧网侧 A 相电压；图 4-7(c)和 4-7(d)分别为机侧网侧有功功率。可以看出，由于换流器控制未投入，机侧网侧始终有电压，但是无法形成功率流动，机侧网侧有功功率始终为零。下图 4-8 为控制刚投入情况下的仿真波形图。



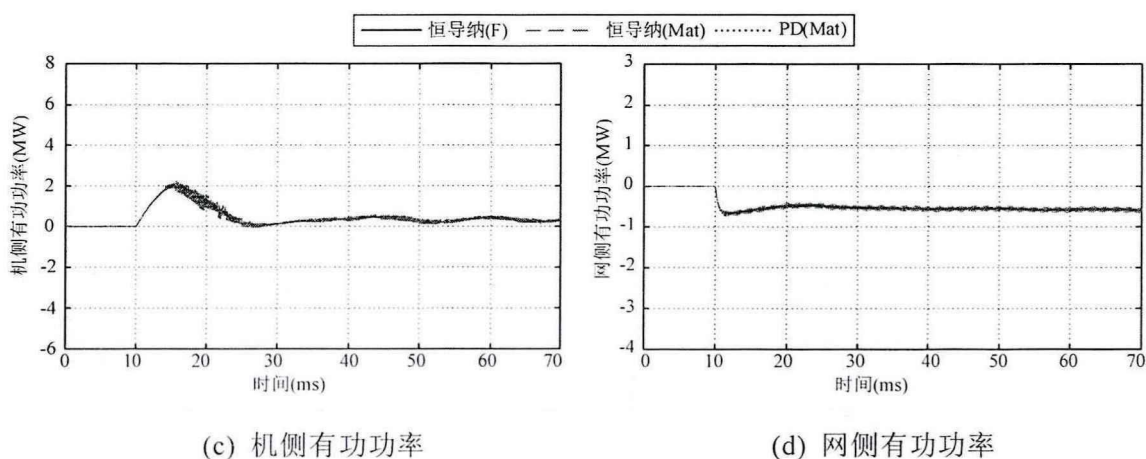


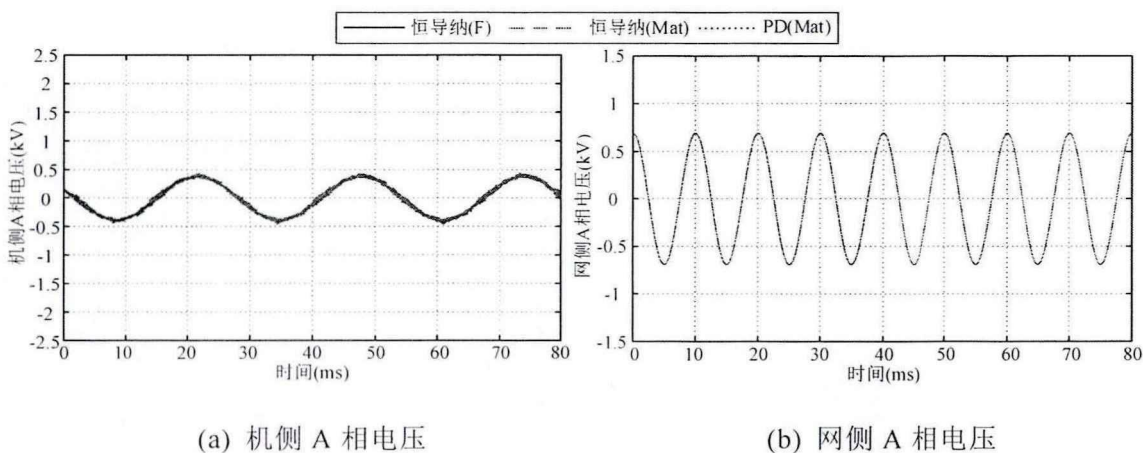
图 4-8 完整模型控制投入时仿真曲线

图 4-8 为完整模型换流器控制投入时的运行仿真图，图 4-8(a)和 4-8(b)分别为机侧网侧 A 相电压；图 4-8(c)和 4-8(d)分别为机侧网侧有功功率。

由仿真曲线中可以看出，在控制未投入和控制投入时的仿真中，基于 FPGA 平台建立的永磁同步发电机模型精度较高。

4.3.2 静态稳定仿真

该小节测试了发电机经过换流器并网的完整 PMSG 机组在稳态运行和风速变化情况下的波形。仿真实验的小扰动为在风速突然降低为切入风速，即风力机输出功率突然为最低值；扰动发生时间为 0.01s，持续时间为 0.1s。其中稳态正常运行仿真波形如图 4-9 所示，小扰动波形如图 4-10 所示。



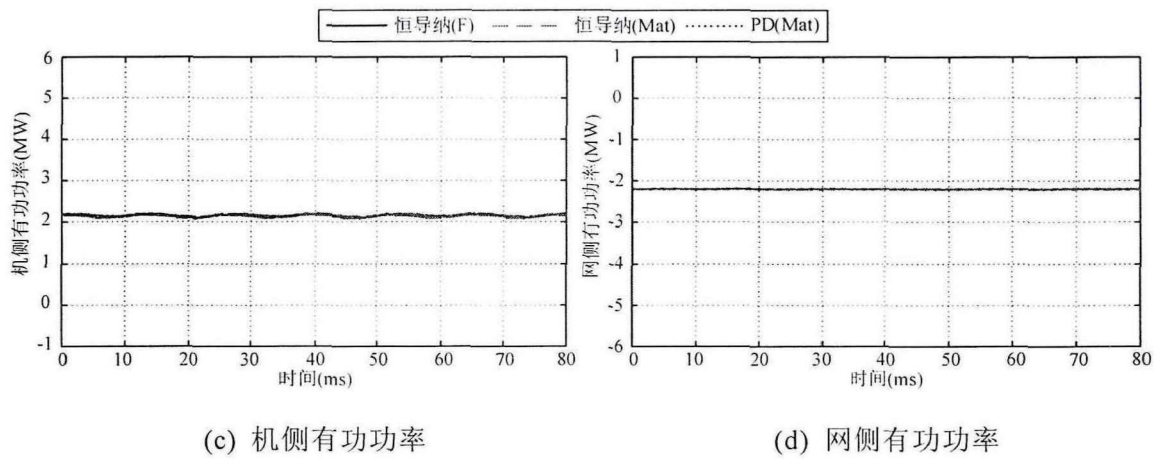


图 4-9 完整模型稳态仿真曲线

上图 4-9 为完整模型稳态情况下的运行仿真图，图 4-9(a)和 4-9(b)分别为机侧网侧 A 相电压；图 4-9(c)和 4-9(d)分别为机侧网侧有功功率。可以看出，由于换流器的不断开关，导致电压和功率仿真结果出现部分毛刺，整体的波形数据拟合的较好。下图 4-10 为小扰动风速变化的仿真波形图。

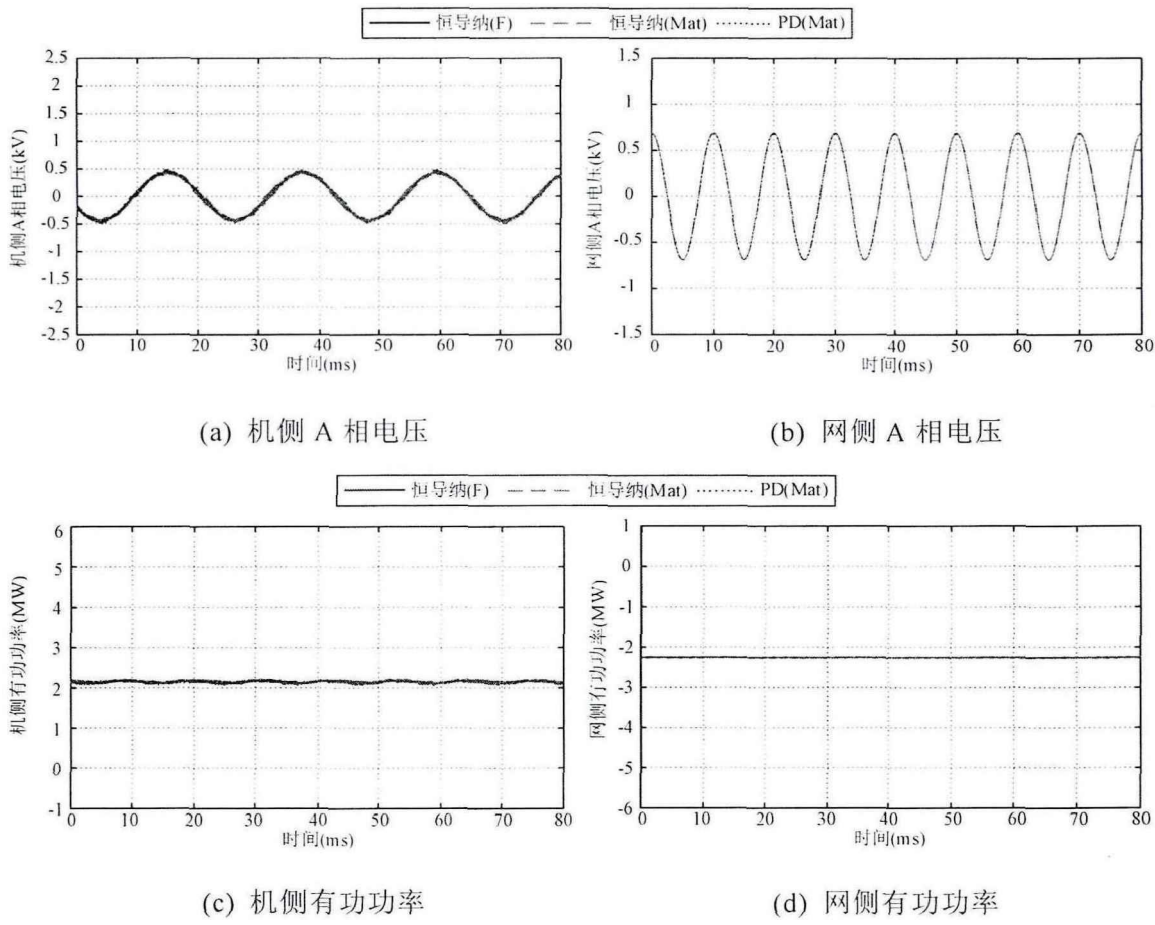


图 4-10 完整模型小扰动仿真曲线

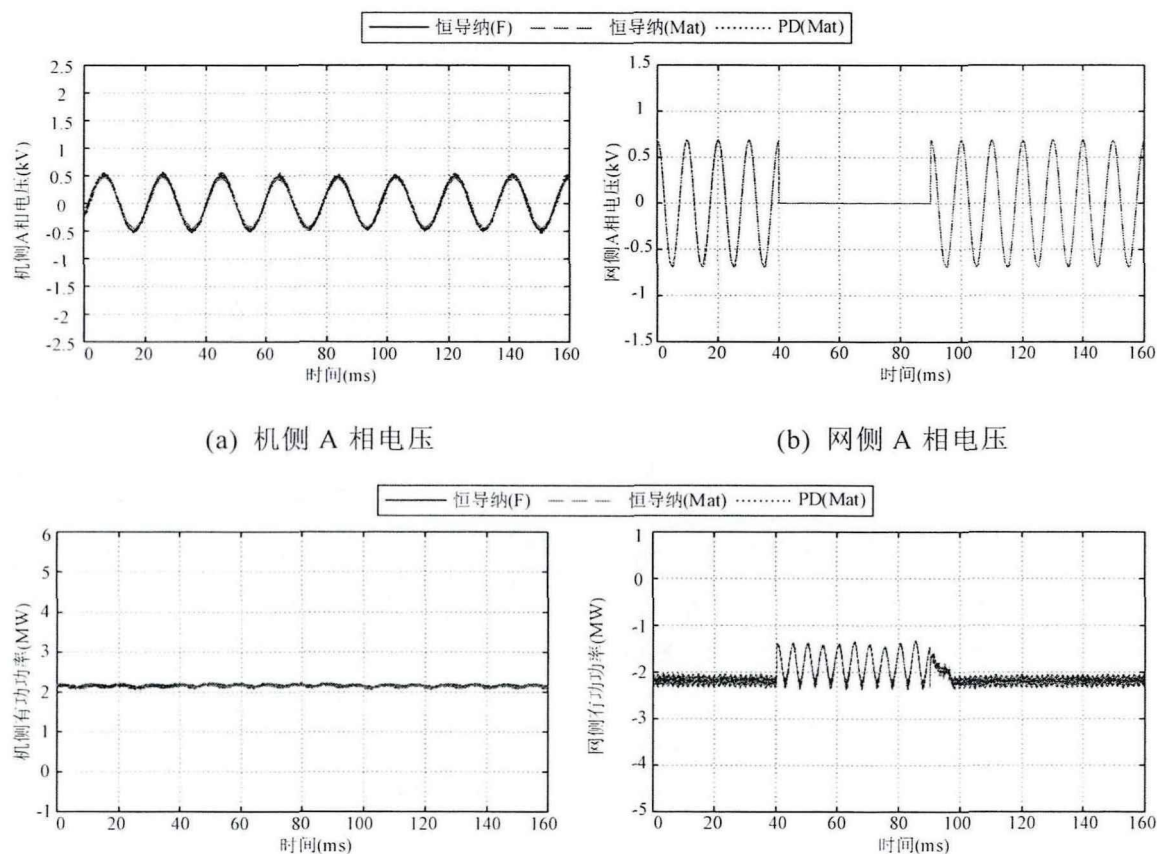
上图 4-10 为完整模型小扰动情况下的运行仿真图，图 4-10(a)和 4-10(b)分别为机侧网侧 A 相电压；图 4-10(c)和 4-10(d)分别为机侧网侧有功功率。

完整 PMSG 机组由于存在风力机转矩部分，存在转动惯量的计算，短时间内风速的变对发电机运行状态的影响可以忽略不计。短时间内内风速变化时输出功率基本不会有变化。由曲线可以看出在稳态和小扰动时 FPGA 平台搭建的恒导纳发电机模型仿真精度较高，与未经过近似的精确模型仿真结果拟合程度较高。

4.3.3 暂态稳定仿真

该小节测试了发电机经过换流器并网的完整 PMSG 机组模型在故障下的暂态工况。由于在实际工程中发电机安置在塔架上，换流器安置在塔架附近，因此发电机机端出现故障的概率非常小，故障多发生在换流器网侧出口端线路上。因此该仿真实验的故障设置在换流器网侧出口端，发生 A 相单相短路接地和三相短路接地故障。

单相短路接地故障发生时间为 0.04s，故障持续时间为 0.05s；三相短路接地故障发生时间为 0.08s，故障持续时间为 0.05s。其中单相短路接地运行仿真波形如图 4-11 所示，三相短路接地波形如图 4-12 所示。



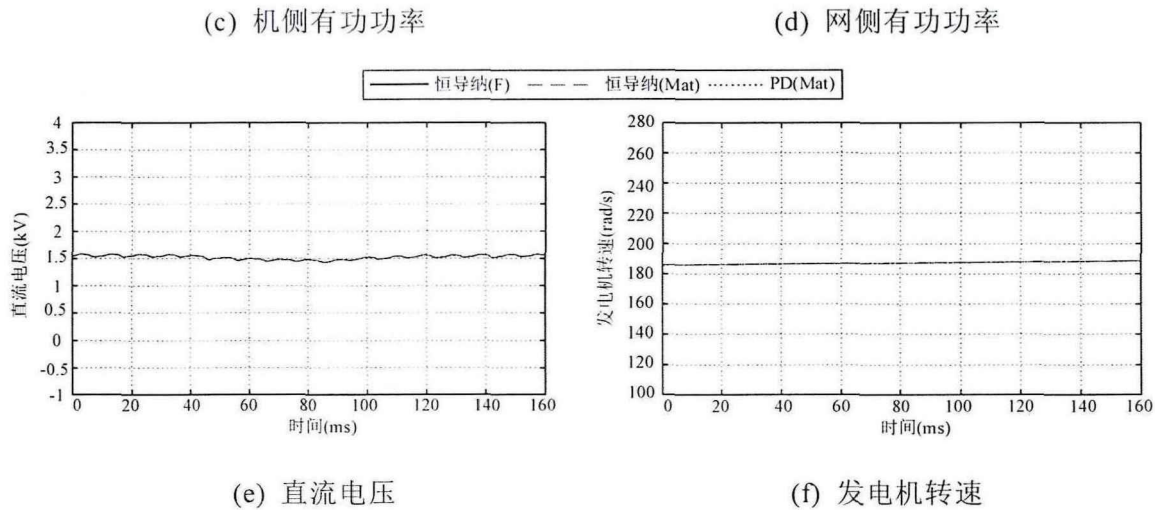
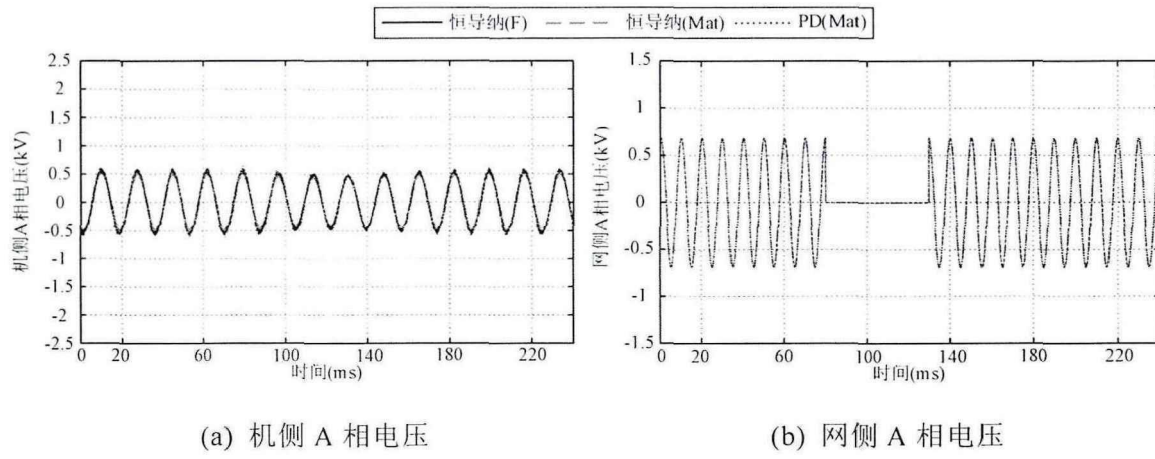


图 4-11 完整模型单相短路接地仿真曲线

上图 4-11 为单机接负载情况下单相短路接地的运行仿真图，图 4-11(a)和 4-11(b)分别为机侧网侧 A 相电压；图 4-11(c)和 4-11(d)分别为机侧网侧有功功率；图 4-11(e)和 4-11(f)分别为直流侧电压和发电机转速。由图可以看出，换流器网侧发生短时间的单相短路接地故障，网侧的输出功率受到影响，由于换流器和控制部分的作用，整流逆变部分起到了隔绝故障影响的作用，直流侧电压出现小幅度降落，发电机机端输出功率和机端电压基本不受网侧故障的影响。

下图 4-12 为发生三相短路接地，对称故障情况下的仿真波形图。



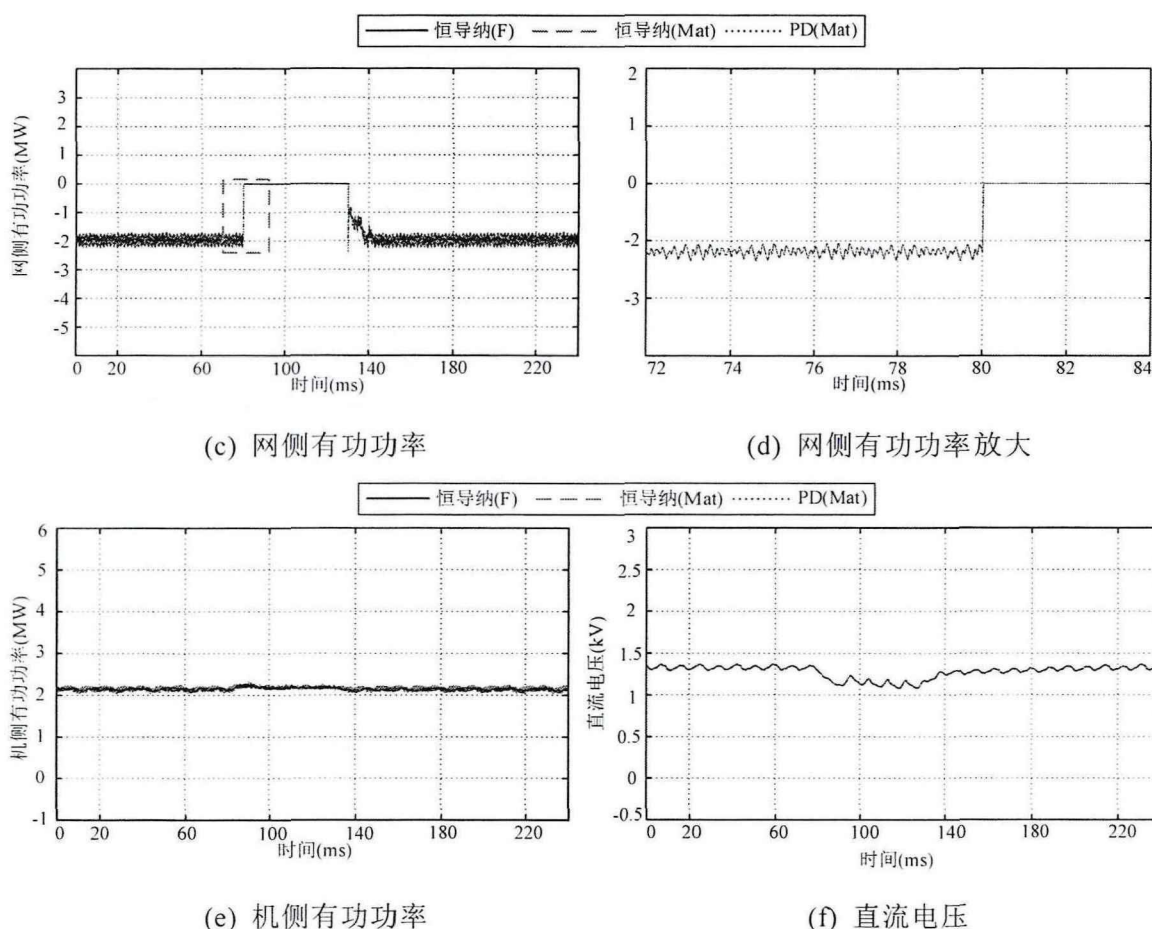


图 4-12 完整模型单相短路接地仿真曲线

图 4-12(a)和 4-12(b)分别为机侧网侧 A 相电压；图 4-12(c)和 4-12(d)分别为网侧有功功率及其放大图；图 4-12(e)和 4-12(f)分别为机侧有功功率和直流侧电压。

由图可以看出，换流器网侧发生短时间的三相短路接地故障，故障会严重影响网侧的输出功率。换流器的逆变部分隔离了故障，大大减少了网侧故障对直流侧电压的影响，直流侧电压仅出现小幅度波动。换流器的整流部分也起到了隔离故障的作用，发电机机端输出功率和机端电压基本不受影响。

由仿真曲线中可以看出，在单相短路接地和三相短路接地的故障中，基于 FPGA 平台建立的永磁同步发电机模型精度较高，和 MATLAB 平台的仿真数据拟合较好。

4.4 本章小结

本章节主要对本文所提出的基于虚拟阻抗补偿的永磁同步发电机恒导纳建模方法，以及基于此方法搭建成出的 FPGA 平台永磁直驱发电机模型进行了仿真

验证。首先通过单个发电机接负载的模型对发电机恒导纳数学模型的静态稳定和暂态稳定进行了验证，证明所提出的恒导纳模型在仿真精度上与发电机经典 PD 模型相差不大。在不影响仿真精度的情况下大大降低了永磁直驱发电机节点导纳矩阵求解的计算量，节省了计算的资源消耗。

随后通过发电机的恒导纳建模方法在 FPGA 平台下搭建出了完整永磁直驱发电机的模型，并针对换流器控制是否投入、稳态及风速变化、对称及不对称故障进行了仿真验证，通过与 MATLAB 平台基于 PD 模型的完整模型对比，证明该 FPGA 平台下的完整模型精度较高。

通过第四章的仿真建模和验证，证明了第二章里仿真平台的设计和第三章里数学模型的提出能够实现永磁直驱发电机的完整数学模型的建立和仿真。

第5章 总结与展望

5.1 总结

在大力发展新能源的当下,对风力发电机进行仿真建模是研究风力发电必要手段。FPGA 由于拥有硬件级的并行计算能力,拥有可高度自定义的硬件流水线结构,逐渐成为电力系统仿真的主流。本文第二章节通过分块解构永磁直驱发电机各个模块的数学模型,将风力机、发电机、换流器、换流器控制等各个模块在 FPGA 平台下搭建。模块之间成并行计算逻辑,整体电网用节点电压法进行离散化小步长计算。整个系统搭建完成后,发现在仿真运行过程中节点电压法的节点导纳矩阵是时变的,即每个步长需要进行一次节点导纳矩阵的求逆,求逆消耗的计算量和板卡资源对 FPGA 仿真而言是不可接受的。

第三章节通过分析节点导纳矩阵,找出其时变量,通过补偿虚拟阻抗的方式使其动态部分系数为零,令模型节点导纳矩阵时不变,并在此基础上搭建了 FPGA 平台下的完整永磁直驱发电机模型。通过第四章节的算例仿真验证,证明所提出的发电机恒导纳模型的仿真精度较高,误差较小。同时第四章节也证明了所搭建的 FPGA 平台的完整永磁直驱发电机模型正确性。完成的核心工作如下:

(1)在 FPGA 环境下搭建了永磁直驱发电机的数学模型。通过分块解构的方式,将永磁直驱发电机的各个子系统在 FPGA 的离散逻辑下建模。首先将风力机子系统进行离散化建模,化简为输入风速、发电机转子转速,输出机械功率和机械转矩的模块,并在 FPGA 系统下实现。对发电机子系统而言,对其电磁耦合部分和机械力矩部分分块建模,模型输入机械功率和机械力矩,输出诺顿等效的历史电流源和节点导纳。对换流器子系统而言,采用伴随离散电路建模方法,将换流器部分的节点导纳恒定。最后用隐式梯形差分法对电容电抗等无源元件进行离散化建模。通过这些方法实现了永磁直驱发电机各个子系统的数学建模。用节点电压法进行联立计算。设计了 FPGA 程序的顶层模块,分析了程序内各个模块的输入输出与并行计算逻辑。将换流器控制系统与电路计算系统形成系统级并行的逻辑,加快系统的速度。列写了完整永磁直驱发电机的十四阶节点导纳矩阵,并发现节点导纳矩阵时变,在 FPGA 平台计算时需要每个步长进行一次节点导纳矩阵的求逆计算。

(2)提出了一种基于虚拟阻抗补偿的永磁同步发电机恒导纳建模方法。对节点导纳矩阵进行分析,发现其时变的主要原因是发电机部分的节点导纳矩阵存在受发电机转子角影响的部分。列写节点导纳矩阵的表达式,发现其时变部分前的

系数都是一样的。于是通过补偿虚拟阻抗的方式,将发电机节点导纳矩阵的时变部分置零,令永磁直驱发电机完整的节点导纳矩阵恒定,在进行 FPGA 计算时不需要每个步长进行一次求逆,只需要在仿真开始之前预处理并输入板卡,每个步长计算时调用即可。

通过对单机接负载模型的仿真结果分析,证明了所提出的发电机恒导纳建模方法的正确性,模型仿真精度较高,并且相比发电机的经典 PD 模型计算量减少了很多。通过对 FPGA 平台的完整永磁直驱发电机仿真结果分析,验证了所搭建的 FPGA 仿真器的仿真精度。

5.2 展望

本文的工作还存在一些可以改进的地方,接下来还需要完善的部分有:

(1)本文的仿真仅仅研究了发电机网侧短路故障的工况,事实上发电机的机侧故障也是存在可能的,并不能完全排除风机的内部系统短路故障的可能性。短路导致的风机低电压穿越情况是接下来研究的重点之一,需要后续进行完善。

(2)目前工程上,永磁直驱发电机都是整合成风场的形式统一并入电网的,搭建单个永磁直驱风机的模型最终还要整合成风场的形式进行仿真研究。风场常常由上百台风机组组成,此时单块 FPGA 板卡的计算资源就不够仿真使用了,需要研究板卡级的并行计算,以及板卡间的小步长通讯,以满足风场仿真的计算需求。

(3)换流器部分采用伴随离散电路模型,在选取最小化功率损耗下的参数,阻尼系数为 0.9 时,也会存在一些虚拟功率损耗的问题,会导致额外的误差。下一步可以采用如负电阻补偿^[58]等更先进的换流器恒导纳模型,降低虚拟功率损耗导致的误差。

参考文献

- [1] 李克强. 政府工作报告[N]. 人民日报, 2021-03-13(001).
- [2] 赵艺涵. 国家电网公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案[EB/OL]. (2021-03-04). [2023-02-27].<http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c17342704/content.html>
- [3] 胡佳. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议强调推动平台经济规范健康发展持续发展把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局[EB/OL]. (2021-03-15).[2023-02-27].<https://www.xuexi.cn/lgpage/detail/index.html?id=13147233567199253794>
- [4] 杨帆. 国家能源局: 积极推动可再生能源重大工程建设[EB/OL]. (2023-02-20) [2023-02-27].https://www.xuexi.cn/lgpage/detail/index.html?id=7857690236085063982&item_id=7857690236085063982
- [5] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [6] 张显, 史连军. 中国电力市场未来研究方向及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16):1-11.
- [7] Enbang W, Zheng G. The effects of clean energy development on China's carbon dioxide emissions control[A]. 2018 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering[C]. IEEE, 2018: 20-24.
- [8] 齐翼. 国家能源局: 2022 年全国风电、光伏发电新增装机突破 1.2 亿千瓦, 再创历史新高 [EB/OL]. (2023-01-28). [2023-02-27].https://www.xuexi.cn/lgpage/detail/index.html?id=10159076678344089623&item_id=10159076678344089623
- [9] 杨帆. 截至 2022 年底全国累计发电装机容量约 25.6 亿千瓦[EB/OL]. (2023-01-28). [2023-02-27]. https://www.xuexi.cn/lgpage/detail/index.html?id=12857048046705737512&item_id=12857048046705737512
- [10] GWEC. Global Wind Report 2022[R]. Spain: Global Wind Energy Council, 2022
- [11] 贾锋, 蔡旭, 李征等. 风电机组精细化建模及硬件在环实时联合仿真[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(04): 1239-1251.
- [12] Bing L, Haoran Z, Junchao D, et al. Design of real-time co-simulation platform for wind energy conversion system[J]. Energy Reports, 2020, 6:403-409.
- [13] Wang S, Zhan P, Wang N. Implementation of Hardware-in-the-Loop Real-time Simulation of Per-Unit Doubly-fed Induction Generator[A]. 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC) [C].

IEEE, 2020: 74-78.

- [14]Dommel H W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1969 (4): 388-399.
- [15]Dommel H W. EMTP theory book[M]. Microtran Power System Analysis Corporation, 1996.
- [16]Long W, Cotcher D, Ruiu D, et al. EMTP-a powerful tool for analyzing power system transients[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1990, 3(3): 36-41.
- [17]Toufan M, Annakkage U D. Simulation of the unified power flow controller performance using PSCAD/EMTDC[J]. Electric power systems research, 1998, 46(1): 67-75.
- [18]Gołębiowski M, Göbel C. Evaluation of the usability of the Canay' s equivalent circuit diagrams for the calculation of subsynchronous resonances[J]. COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 2019, 38(4): 1347-1356.
- [19]Yang T, Li X, Yin S, et al. A Datasheet-Driven Nonsegmented Empirical SPICE Model of SiC MOSFET With Improved Accuracy and Convergence Capability[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022.
- [20]Sharifov B N, Safaraliev M K, Manusov V Z, et al. Electromagnetic transients in the control system of output parameters of a solar power plant in Tajikistan Central Asia region[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(9): 5757-5765.
- [21]Marti J R, Louie K W. A phase-domain synchronous generator model including saturation effects[J], IEEE Trans. Power System,1997,12(1) 222-229.
- [22]Wang L et al, Methods of interfacing rotating machine models in transient simulation programs[J], IEEE Trans, Power Del, 2010, 25, (2): 891–903.
- [23]Brandwajn V. Synchronous generator models for the analysis of electromagnetic transients[D], Ph.D. dissertation, Univ. British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 1977.
- [24]Lauw H K, Meyer W S. Universal machine modeling for the representation of rotating electric machinery in an electromagnetic transients program[J], IEEE Trans. Power App. Syst., 1982,101(6):1342 - 1351.
- [25]Gole A M, Menzies R, Turanli P. Woodford D, Improved interfacing of electrical machine models to electromagnetic transients programs[J], IEEE Trans. Power App. Syst., 1984,103(9):2446 - 2451.
- [26]Wang L, Jatskevich J. A voltage-behind-reactance synchronous machine model for the EMTP-type solution[J], IEEE Trans. Power Syst.,2006, 21(4): 1539-1549.

- [27]Subramaniam P, Malik O P. Digital simulation of a synchronous generator in direct-phase quantities[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1971, 118(1):153-160.
- [28]Rafian M, Laughton M A. Determination of synchronous-machine phase-co-ordinate parameters[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1976, 123(8):818-824.
- [29]曹阳, 顾伟, 柳伟, 曹戈, 楼冠男, 邹德虎. 基于交叉初始化的换流器参数化恒导纳模型[J]. 中国电机工程学报, 2021,41(10):3518-3527+3676.
- [30]MathWorks. SIMULINK, Dynamic System Simulation Software[M], The MathWorks, 2012.
- [31]李升健, 于伟城, 黄灿英. 电力系统实时数字仿真技术及其应用综述[J]. 江西电力, 2012, 36(05):73-76.
- [32]魏明, 崔桂梅. 电力系统实时数字仿真器 RTDS 简介[J]. 装备制造技术, 2008, No.162(06):128-130.
- [33]Park M, Yu I K. A novel real-time simulation technique of photovoltaic generation systems using RTDS[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 164-169.
- [34]Schenkman B L, Wilson D G, Robinett R D, et al. Photovoltaic distributed generation for lanai power grid real-time simulation and control integration scenario[A]. SPEEDAM 2010[C]. IEEE, 2010: 154-157.
- [35]Paré D, Turmel G, Soumagne J C, et al. Validation tests of the hypersim digital real time simulator with a large AC-DC network[A]. Proc. Int. Conf. Power System Transients[C]. 2003: 577-582.
- [36]OPAL-RT Inc. RT-LAB 6.0 User's Manual[M]. OPAL-RT Inc,2004.
- [37]刘水, 王海群, 王致杰等. 电力系统全数字实时仿真技术[J]. 科技与创新, 2017, No.90(18):20-22.
- [38]Bélanger J, Lapointe V, Dufour C, et al. eMEGAsim: An open high-performance distributed real-time power grid simulator. Architecture and specification[A]. Proceedings of the International Conference on Power Systems (ICPS 2007) [C]. 2007: 12-24.
- [39]Lei X, Lerch E, Povh D, et al. A large integrated power system software package-NETOMAC[A]. POWERCON'98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings[C]. IEEE, 1998, 1: 17-22.
- [40]dSPACE HIL Systems Business-Field-Brochure English[M]. d SPACE Inc,2016.
- [41]田芳, 李亚楼, 周孝信等. 电力系统全数字实时仿真装置[J]. 电网技术, 2008, No. 291(22):17-22.
- [42]付绍文. 基于 FPGA 的微电网实时仿真研究[D]. 天津大学, 2018.

- [43]王成山, 丁承第, 李鹏等. 基于 FPGA 的配电网暂态实时仿真研究(一):功能模块实现[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(01): 161-167.
- [44]王成山, 丁承第, 李鹏等. 基于 FPGA 的配电网暂态实时仿真研究(二):系统架构与算例验证[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(04):628-634.
- [45]王泽琳. 基于 FPGA 的双馈风电机组实时仿真系统研究[D]. 山东大学, 2021.
- [46]丁承第. 基于 FPGA 的有源配电网实时仿真方法研究[D]. 天津大学, 2014.
- [47]夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程(第 2 版)[M]. 北京.航天航空大学出版社, 2008.
- [48]付浩, 秦浩. FPGA 测试方法和流程探讨[J]. 科技风, 2017, No.316(10):77-78.
- [49]El Hawary M I, Hamza G G, Zekry A, et al. FPGA Implementation of Tracking Phase of the GPS Receiver Using XSG[J]. J. Commun., 2020, 15(4): 367-371.
- [50]陈瑞. 基于 Vivado HLS 的时域有限差分方法硬件加速研究[D]. 厦门大学, 2017.
- [51]郑玉. 基于 HLS 的 Sobel 边缘检测算法的 FPGA 实现[D]. 北京工业大学, 2017.
- [52]Holdsworth L, Wu X G, Ekanayake J B, et al. Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(3): 343-352.
- [53]Taflove A, Hagness S C. Computational electrodynamics[M]. Artech house, 2005.
- [54]Wu Bin, Lang Yongqiang, Zargari Navid, et al. 风力发电系统的功率变换与控制[M]. 机械工业出版社, 2012.
- [55]韩晓耀. 基于叶素动量理论的大力矩叶片设计与研究[D]. 河北工业大学, 2020
- [56]江诗杰. 风电机组的变桨距控制技术研究[D]. 福建工程学院, 2022.
- [57]倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 清华大学出版社有限公司, 2002.
- [58]侯延琦, 刘崇茹, 郑乐等. 基于负电阻补偿的 VSC 恒导纳建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19):6985-6995.
- [59]Giesbrecht T M J. Small Time-step ($<2\mu\text{Sec}$) VSC Model for the Real Time Digital Simulator[A]. International Conference on Power System Transients (IPST) [C], Canada. 2005.
- [60]王瑶, 许建平, 周国华. 电压型控制 SIDO CCM Buck 变换器的统一离散迭代映射模型及稳定性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(09):2717-2727+2841.
- [61]余浩然. 基于 FPGA 的大规模矩阵求逆电路设计[D]. 合肥工业大学, 2022.
- [62]Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京, 水利电力出版社, 1991.

- [63]Mahseredjian J, Dube L, Zou M, et al. Simultaneous solution of control system equations in EMTP[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 117-124.
- [64]李鹏, 丁承第, 王成山等. 基于多核心处理器的分布式发电微网系统暂态并行仿真方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16):171-178+4.
- [65]徐晋, 汪可友, 李国杰等. 基于响应匹配的电力电子换流器恒导纳建模[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13):3879-3889.
- [66]曹阳, 顾伟, 柳伟等. 基于交叉初始化的换流器参数化恒导纳模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10):3518-3527+3676.
- [67]Hui S Y R, Christopoulos C. A discrete approach to the modeling of power electronic switching networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1990, 5(4):398-403.
- [68]侯延琦, 刘崇茹, 王鑫艳, 郑乐. IGBT 开关模块的附加支路恒导纳模型[J/OL]. 中国电机工程学报,1-12[2022-07-19].
- [69]Krause P C, Wasynczuk O, Sudhoff S D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems [M]. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002.
- [70]Pekarek S D, Walters E A. An accurate method of neglecting dynamic saliency of synchronous machines in power electronic based systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4):1177-1183.
- [71]汤涌. 简化同步电机模型中的运动方程[J]. 电网技术, 2007(10):28-31.
- [72]胡寿松. 自动控制原理(第四版)[M]. 科学出版社, 2001.