

# 电机瞬态过程分析的 MATLAB 建模与仿真

DIANJI SHUNTAI GUOCHENG FENXI DE  
MATLAB JIANMO YU FANGZHEN

黄守道 邓建国 罗德荣 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

# 电机瞬态过程分析的 MATLAB 建模与仿真

黄守道 邓建国 罗德荣 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING



## 内 容 简 介

本书从电机数学模型、Matlab/Simulink 仿真模型和仿真实例三个层面进行阐述, 理论联系实际。书中详细介绍了直流电机、变压器、感应电机和同步电机的数学模型, 用 Matlab/Simulink 仿真软件建立了相应的仿真模型, 对于每一种电机都给出了多种仿真模型, 用建立的仿真模型进行仿真实例分析, 并给出详细的仿真结果, 仿真分析的内容几乎涉及电机瞬变运行过程的各个方面。

本书可供电机工程技术人员参考, 也可作为高等院校电气工程及其自动化专业本科高年级学生和研究生教材。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

电机瞬态过程分析的 MATLAB 建模与仿真/黄守道, 邓建国, 罗德荣编著. —北京: 电子工业出版社, 2013.8

ISBN 978-7-121-21318-2

I. ①电… II. ①黄… ②邓… ③罗… III. ①电机—计算机仿真—Matlab 软件 IV. ①TM306

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 199090 号

责任编辑: 曲 昕

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21 字数: 537 千字

印 次: 2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 58.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

电机的瞬态过程是电机运行状态的变化过程,是从一种稳态到另一种稳态的过渡运行过程。电机瞬态过程的分析通常通过建立用微分方程描述的数学模型,然后根据所建立的数学模型编写计算机仿真程序或构造计算机仿真模型,求得电机中的电磁量和机械量随时间变化的规律。电机的瞬态分析方法是电机分析的一般方法,现在已成为现代电机研究中的核心内容之一。所以,掌握电机瞬态的分析方法对于高等院校电气工程及其自动化专业和相关专业的学生及从事电机工程的技术人员来说,显得尤为重要。

“电机瞬态分析”是电气工程及其自动化专业高年级学生和研究生的一门选修课程,但是,迄今为止,还没有一本全面介绍电机数学模型、计算机仿真模型和仿真实例的教材,本书就是为了弥补这一缺憾而编写的。

本书的特点:电机数学模型与 Matlab/Simulink 仿真模型以及仿真实例全面结合,理论联系实际;内容丰富,电机种类多、仿真模型多和仿真实例多,对于每一种电机都给出了多种仿真模型,仿真分析的内容几乎涉及电机瞬变运行过程的各个方面。全书共分五章:第 1 章分析电机瞬态过程及 Matlab 建模所需的一些基础知识,包括坐标变换、标么值概念以及用 Matlab/Simulink 建立电机仿真模型的基本方法等;第 2 章的主要内容是直流电机的数学模型建立方法、直流电机 Matlab/Simulink 仿真模型的建立方法和仿真实例分析(并励直流电机的启动过程、制动过程、调速过程和故障运行过程的仿真分析以及并励直流发电机自励建压过程的仿真分析等);第 3 章讲述单相变压器、三相变压器的数学模型建立方法,变压器的 Matlab/Simulink 仿真模型和仿真实例分析;第 4 章包括单相、三相和多相感应电机的数学模型建立,双馈电机、双定子感应电机和直线感应电机的数学模型以及它们的多种仿真模型,通过实例详细地对三相感应电机的启动、制动、调速过程和故障运行过程进行仿真计算和分析,对三相、六相感应发电机的自励建压过程进行仿真分析,对五相感应电机、双馈电机、双定子感应电机和直线感应电机的启动过程进行仿真分析,对多相感应电机的故障运行过程进行仿真分析,对单相供电的三相感应电动机的启动运行和稳态运行性能进行仿真分析;第 5 章的主要内容是单相、三相、多相同步电机的数学模型和仿真模型建立,单相、三相、多相永磁同步电机的数学模型和仿真模型建立,以及三相磁阻同步电机的数学模型和仿真模型建立,通过实例对它们作为电动机运行和发电机运行的瞬态过程进行仿真计算,双转子三相永磁同步电动机的数学模型、仿真模型建立和实例分析,无刷直流电动机驱动系统的建模和仿真分析。书中的所有仿真模型和仿真程序都在 Matlab 2010a 版本中验证通过。

本书由湖南大学黄守道、邓建国和罗德荣编写,黄守道编写了第 1 章~第 3 章和第 5 章的前 4 节,邓建国编写了第 4 章,罗德荣编写了第 5 章最后 1 节。全书由黄守道统稿。

本书可供电机工程技术人员参考，也可作为高等院校电气工程及其自动化专业高年级学生和研究生试用教材。

本书在编写过程中参考的国内外有关文献，均列于书末。由于作者水平有限，加之编写时间仓促，缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编 者  
2013年7月于长沙

# 目 录

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                      | 1  |
| 1.1 研究电机瞬态过程的意义 .....               | 1  |
| 1.2 电机运行计算机仿真的优点 .....              | 1  |
| 1.3 电机瞬态分析的特点 .....                 | 2  |
| 1.4 理想电机的假定 .....                   | 2  |
| 1.5 坐标变换 .....                      | 3  |
| 1.5.1 多相坐标系 .....                   | 3  |
| 1.5.2 $dq\alpha$ 任意速正交坐标系 .....     | 3  |
| 1.5.3 $\alpha\beta 0$ 静止正交坐标系 ..... | 5  |
| 1.6 正方向规定 .....                     | 5  |
| 1.6.1 电动机惯例 .....                   | 6  |
| 1.6.2 发电机惯例 .....                   | 6  |
| 1.7 标么制 .....                       | 6  |
| 1.8 Matlab 软件简介 .....               | 8  |
| 1.9 电机建模实例 .....                    | 10 |
| 1.9.1 永磁直流电动机的瞬态数学模型 .....          | 10 |
| 1.9.2 永磁直流电动机 Simulink 仿真模型 .....   | 12 |
| 第 2 章 直流电机瞬态过程分析的建模和仿真 .....        | 15 |
| 2.1 直流电机的数学模型 .....                 | 15 |
| 2.1.1 他励直流电机的数学模型 .....             | 15 |
| 2.1.2 并励直流电机的数学模型 .....             | 16 |
| 2.1.3 串励直流电机的数学模型 .....             | 16 |
| 2.1.4 长复励直流电机的数学模型 .....            | 17 |
| 2.1.5 短复励直流电机的数学模型 .....            | 17 |
| 2.2 直流电机的仿真模型 .....                 | 18 |
| 2.2.1 他励直流电机的仿真模型 .....             | 18 |
| 2.2.2 并励直流电机的仿真模型 .....             | 20 |
| 2.2.3 串励直流电机仿真模型 .....              | 22 |
| 2.2.4 长复励直流电机的仿真模型 .....            | 23 |
| 2.2.5 短复励直流电机的仿真模型 .....            | 25 |
| 2.3 直流电动机的运行状态 .....                | 27 |
| 2.3.1 直流电动机的启动方法 .....              | 27 |
| 2.3.2 并励直流电动机的制动 .....              | 28 |

|       |                                   |    |
|-------|-----------------------------------|----|
| 2.3.3 | 并励直流电动机调速 .....                   | 30 |
| 2.4   | 仿真实例 .....                        | 30 |
| 2.4.1 | 并励直流电动机的启动过程仿真 .....              | 30 |
| 2.4.2 | 并励直流电动机的制动过程仿真 .....              | 32 |
| 2.4.3 | 并励直流电动机调速过程仿真 .....               | 35 |
| 2.4.4 | 并励直流电动机故障运行仿真 .....               | 36 |
| 2.4.5 | 串励电动机瞬态过程仿真 .....                 | 38 |
| 2.4.6 | 并励直流发电机自励建压过程仿真 .....             | 40 |
| 第 3 章 | 变压器瞬变过程分析的建模和仿真 .....             | 42 |
| 3.1   | 变压器的数学模型 .....                    | 42 |
| 3.1.1 | 单相双绕组变压器的数学模型 .....               | 42 |
| 3.1.2 | 单相三绕组变压器的数学模型 .....               | 46 |
| 3.2   | 变压器的仿真模型 .....                    | 48 |
| 3.2.1 | 单相双绕组变压器的仿真模型 .....               | 48 |
| 3.2.2 | 单相三绕组变压器的仿真模型 .....               | 53 |
| 3.2.3 | 三相变压器组的仿真模型 .....                 | 56 |
| 3.3   | 实例仿真 .....                        | 57 |
| 3.3.1 | 单相双绕组变压器瞬态过程仿真 .....              | 58 |
| 3.3.2 | 单相三绕组变压器瞬态仿真 .....                | 61 |
| 3.3.3 | 三相双绕组变压器组瞬态仿真 .....               | 62 |
| 3.3.4 | 三相三绕组变压器组瞬态仿真 .....               | 68 |
| 第 4 章 | 感应电机瞬态过程分析的建模和仿真 .....            | 72 |
| 4.1   | 三相感应电机的数学模型 .....                 | 72 |
| 4.1.1 | 相坐标系中三相感应电机的数学模型 .....            | 72 |
| 4.1.2 | 任意速 dqn 坐标系中瞬态数学模型 .....          | 74 |
| 4.1.3 | 任意速 dqn 坐标系中的状态方程 .....           | 76 |
| 4.1.4 | 考虑铁心损耗时静止坐标系的数学模型 .....           | 78 |
| 4.1.5 | 定子三相 ABC 静止坐标系中的数学模型 .....        | 79 |
| 4.2   | 双笼转子三相感应电机的瞬态数学模型 .....           | 80 |
| 4.2.1 | 相坐标模型 .....                       | 80 |
| 4.2.2 | 定子基准下的 abc/dq 模型 .....            | 81 |
| 4.2.3 | 任意速坐标系下的 dq/dq 模型 .....           | 82 |
| 4.3   | 三相感应电机定子绕组匝间短路的数学模型 .....         | 83 |
| 4.3.1 | 定子相坐标系中的数学模型 .....                | 84 |
| 4.3.2 | 定子绕组匝数不相等的静止 dq 坐标系模型 .....       | 86 |
| 4.3.3 | 定子绕组匝间短路 (A 相) 的静止 dq 坐标系模型 ..... | 87 |
| 4.4   | 单相电容感应电动机的瞬态数学模型 .....            | 88 |
| 4.4.1 | 单相感应电动机 dq 轴数学模型 .....            | 88 |
| 4.4.2 | 单相感应电动机 dq 轴空间向量数学模型 .....        | 90 |

|         |                                        |     |
|---------|----------------------------------------|-----|
| 4.4.3   | 单相感应电动机 dq 轴混合磁链数学模型 .....             | 90  |
| 4.5     | 五相感应电机的数学模型 .....                      | 91  |
| 4.5.1   | 静止相坐标系中五相感应电机的数学模型 .....               | 92  |
| 4.5.2   | 静止 $\alpha\beta$ 坐标系中五相感应电机的数学模型 ..... | 93  |
| 4.6     | 六相感应电机的数学模型 .....                      | 94  |
| 4.6.1   | 任意速 dq 坐标系下六相感应电机的数学模型 .....           | 95  |
| 4.6.2   | 静止 dq 坐标系下六相感应电机的混合磁链数学模型 .....        | 96  |
| 4.6.3   | 六相感应电机的任意速 dq 坐标系中的空间向量数学模型 .....      | 99  |
| 4.7     | 三相直线感应电动机的瞬态数学模型 .....                 | 100 |
| 4.8     | 双定子三相感应电动机的瞬态数学模型 .....                | 103 |
| 4.8.1   | 双定子三相笼型感应电动机的基本结构和运行原理 .....           | 103 |
| 4.8.2   | 双定子三相笼型感应电动机的数学模型 .....                | 104 |
| 4.9     | 笼型转子无刷双馈电机的数学模型 .....                  | 106 |
| 4.9.1   | 无刷双馈电机相坐标系中的数学模型 .....                 | 107 |
| 4.9.2   | 无刷双馈电机转子速 dq 坐标系中的数学模型 .....           | 108 |
| 4.10    | 三相感应电机的仿真模型 .....                      | 110 |
| 4.10.1  | 单笼转子或绕线式转子三相感应电机仿真模型 .....             | 110 |
| 4.10.2  | 双笼转子三相感应电机仿真模型 .....                   | 120 |
| 4.10.3  | 三相感应电机定子绕组匝间短路的仿真模型 .....              | 123 |
| 4.10.4  | 单相感应电动机的仿真模型 .....                     | 125 |
| 4.10.5  | 五相感应电机的仿真模型 .....                      | 128 |
| 4.10.6  | 六相感应电机的仿真模型 .....                      | 130 |
| 4.10.7  | 三相直线感应电动机的仿真模型 .....                   | 138 |
| 4.10.8  | 双定子感应电动机的仿真模型 .....                    | 142 |
| 4.10.9  | 双馈感应电机的仿真模型 .....                      | 142 |
| 4.11    | 仿真实例分析 .....                           | 146 |
| 4.11.1  | 三相感应电动机启动过程仿真分析 .....                  | 146 |
| 4.11.2  | 三相感应电动机制动过程仿真分析 .....                  | 157 |
| 4.11.3  | 三相感应电动机故障运行过程仿真分析 .....                | 161 |
| 4.11.4  | 三相自励感应发电机瞬态过程仿真分析 .....                | 169 |
| 4.11.5  | 单相电源供电的三相感应电动机瞬态仿真分析 .....             | 170 |
| 4.11.6  | 单相感应电动机启动过程仿真分析 .....                  | 179 |
| 4.11.7  | 五相感应电动机瞬态仿真分析 .....                    | 180 |
| 4.11.8  | 六相双 $Y30^\circ$ 相移感应电动机瞬态过程仿真分析 .....  | 182 |
| 4.11.9  | 三相直线感应电动机瞬态过程仿真分析 .....                | 189 |
| 4.11.10 | 双定子笼型感应电动机启动过程仿真分析 .....               | 192 |
| 4.11.11 | 无刷双馈电机瞬态仿真 .....                       | 193 |
| 第 5 章   | 同步电机瞬变过程分析的建模和仿真 .....                 | 196 |
| 5.1     | 同步电机的数学模型 .....                        | 196 |

|         |                         |     |
|---------|-------------------------|-----|
| 5.1.1   | 三相同步电机的数学模型             | 196 |
| 5.1.2   | 三相同步磁阻电机的数学模型           | 204 |
| 5.1.3   | 六相同步电机的数学模型             | 209 |
| 5.2     | 永磁同步电机的数学模型             | 213 |
| 5.2.1   | 三相永磁同步电机的数学模型           | 213 |
| 5.2.2   | 三相永磁直线同步电动机的数学模型        | 215 |
| 5.2.3   | 六相永磁同步电机的数学模型           | 217 |
| 5.2.4   | 单相永磁同步电动机的数学模型          | 221 |
| 5.2.5   | 双转子永磁同步电动机的数学模型         | 223 |
| 5.3     | 同步电机的仿真模型               | 226 |
| 5.3.1   | 三相同步电机仿真模型              | 226 |
| 5.3.2   | 三相同步磁阻电机仿真模型            | 231 |
| 5.3.3   | 六相同步电机仿真模型(双Y30相移定子绕组)  | 234 |
| 5.3.4   | 三相永磁同步电机仿真模型            | 236 |
| 5.3.5   | 三相永磁直线同步电机仿真模型          | 238 |
| 5.3.6   | 六相永磁同步电机仿真模型            | 239 |
| 5.3.7   | 单相永磁同步电机的仿真模型           | 240 |
| 5.3.8   | 双转子三相永磁同步电动机的仿真模型       | 242 |
| 5.4     | 同步电机瞬态过程仿真              | 243 |
| 5.4.1   | 三相同步发电机的瞬态过程仿真          | 243 |
| 5.4.2   | 三相同步电动机启动过程瞬态仿真分析       | 249 |
| 5.4.3   | 三相同步电动机制动过程瞬态仿真分析       | 256 |
| 5.4.4   | 三相同步磁阻电动机瞬态过程仿真分析       | 258 |
| 5.4.5   | 六相同步电动机(双Y定子绕组)瞬态过程仿真分析 | 260 |
| 5.4.6   | 三相永磁同步电动机瞬态过程仿真分析       | 263 |
| 5.4.7   | 三相永磁直线同步电动机瞬态过程仿真分析     | 268 |
| 5.4.8   | 六相永磁同步电动机瞬态过程仿真分析       | 270 |
| 5.4.9   | 单相永磁同步电动机瞬态过程仿真分析       | 272 |
| 5.4.10  | 双转子三相永磁同步电动机瞬态过程仿真分析    | 275 |
| 5.5     | 无刷直流电动机驱动系统的建模与仿真       | 279 |
| 5.5.1   | 引言                      | 279 |
| 5.5.2   | 无刷直流电动机系统的基本结构          | 279 |
| 5.5.3   | 无刷直流电动机的工作原理            | 280 |
| 5.5.4   | 无刷直流电动机的数学模型            | 282 |
| 5.5.5   | 无刷直流电动机传动系统仿真模型         | 283 |
| 5.5.6   | 仿真结果及其分析                | 290 |
| 附录: 源程序 |                         | 298 |
| 参考文献    |                         | 325 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究电机瞬态过程的意义

电机的瞬态过程是电机运行状态的变化过程，是从一种稳态运行到另一种稳态运行的过渡过程，它是电机内的一种电磁场储能和转子动能随时间而变化的过程。当与电机相关联的任一参量发生变化时均可引起电机的瞬态过程。例如，变压器的空载合闸、电动机的启动、制动、调速，发电机的励磁调节，电机正常运行时的负载改变以及突然不正常运行等。电机的瞬态过程一般来说持续时间很短，但在不利的情况下，可能导致严重的后果。因此，深入了解和研究这一阶段各物理量的变化规律具有重要的理论和实际意义。具体说来有以下几个方面。

电机的瞬态电流往往为额定值的几倍到几十倍，可能对电机本身及其系统产生不良影响或严重后果：冲击电流产生机械应力、冲击转矩，可能使电机发生剧烈的机械振动以及转速升高现象，损坏电机主轴或其他部件；感应电动机的启动电流导致电网电压下降，影响电网上其他电气设备的正常工作。瞬变过程中，电机还可能发生严重的过电压现象。这就要求研究分析电机发生瞬变过程时的各状态量，了解瞬变过程所能产生的影响或后果，以改进电机的设计方案及制造方案，并提出相应的继电保护方案。

在自动控制系统中，主要是研究系统中各元件及整个系统的动态特性。而电机往往是系统中的核心元件，所以，了解并掌握电机的瞬态性能是十分必要的。也可以说，机电系统的动态控制是以瞬态分析计算为基础的。例如，电动机伺服驱动系统中，动态转矩的控制是实现高性能速度和位置伺服驱动的基础和关键。

电机本身及电力电子元件的非线性性质是产生谐波的主要根源，要研究电机及其系统的电磁谐波影响及其抑制措施应从研究电机瞬变过程入手。

总之，随着科学技术的不断进步，感应电动机的负载要求它经常运行在启动、调速、制动状态；电机及其拖动系统日趋复杂；电机运行的自动化程度和可靠性要求越来越高；电机及电力系统的经济可靠运行等都要求我们充分或全面掌握电机瞬态的分析计算方法。

## 1.2 电机运行计算机仿真的优点

电机本身就是一个非线性、多变量、强耦合的系统，电机瞬态过程必须由一组非线性微分方程来描述，用数值计算方法求解非线性微分方程组，对包含各类运行过程和运行条件的复杂的电机瞬态过程进行数值计算和性能仿真，已成为现代电机研究的核心内容之一。目前，用计算机对电机运行过程进行仿真已成为研究电机及其系统的不可缺少的一种手段，它可以从理论上揭示电机及其系统在运行过程中的各电磁量、机电量等的变化规律，为分析电机及其系统的性能和确定其性能指标、构成更完备的电机运行控制调节方案提供直接的理论依据。对电机及其系统进行计算机仿真主要有以下几方面的优点。

(1) 电机产品在制造出来之前, 就能预测它的特性, 获得电机性能的数据资料, 发现电机原型中存在的问题, 就可以在计算机中修改设计参数, 以期获得理想的性能, 实现优化设计, 从而增加样机首次应用成功的可能性, 还可以确定多组参数组合来优化电机的性能指标。

(2) 另一方面, 在实验室由于安全原因或是由于成本问题而不能进行的破坏性试验, 可以很容易通过仿真来做, 对故障和异常情况下的响应也可进行全面分析。

(3) 仿真是一种多快好省的研究方法, 进行一次仿真研究的准备工作比在实际物理模型上的安装、接线、调试等准备工作的工作量要小得多, 周期也短得多, 所以耗资也少得多。

### 1.3 电机瞬态分析的特点

电机瞬态分析有以下特点: 以时间作为变量, 数学模型为微分方程, 各物理量均以瞬时值表示; 稳态分析是瞬态分析的一个特例, 瞬态分析方法是一般分析方法; 瞬态问题的数学模型一般是非线性的, 或者是带有时变系数的线性微分方程, 方程的求解有一定困难, 通常用数值方法求解; 简化假定、绕组折算和坐标变换等是惯用的处理方法。

### 1.4 理想电机的假定

为简化问题的分析, 在建立电机的数学模型时通常要作出一些简化假定, 所谓理想电机的假定条件是: 不考虑电机磁路中的剩磁、饱和、磁滞和涡流效应; 不考虑电机绕组的集肤效应和温度效应; 气隙磁通密度在空间按正弦分布; 不计定、转子表面齿和槽的影响; 电机结构对直轴和交轴都是对称的。

上述假定的目的是为了简化问题的分析, 但有时候根据具体的实际情况和分析要求有必要加以修正和补充。

上述假定简化问题分析的理由是:

(1) 不考虑剩磁、饱和、磁滞和涡流效应, 即磁路为线性。可以利用叠加定理。此时, 电机中某线圈交链的总磁链就等于各个线圈电流分别产生并与之交链的磁链的代数和。

一般情况下, 剩磁、涡流等影响不大, 可以忽略不计。要考虑剩磁影响时, 可以利用恒值励磁电流加以考虑; 涡流效应可以利用等效短路线圈加以考虑; 饱和效应可以根据磁化曲线加以考虑。

(2) 在电流频率较低和电机运行的温度变化不显著时, 绕组的电阻可看做常数, 否则, 根据具体情况作非线性电阻处理。

(3) 采用空间矢量的前提是电机内的磁场分布为正弦分布, 这对于瞬态或是稳态分析都是重要的。

磁场高次谐波的影响可以通过差漏形式来计算或采用“多回路理论”加以考虑。

(4) 不计齿和槽的影响, 即不考虑齿谐波磁场。此时, 气隙磁密分布均匀, 电感系数的计算变得十分简单。

需要考虑磁场的齿谐波时, 可以应用磁路的磁导分析法和磁场法来计算电感系数。

对于直流电机而言, 所谓的理想电机假定, 就是电刷在几何中性线上, 磁路线性,

不考虑转子表面的齿、槽效应以及励磁绕组和电枢绕组的温度效应。

## 1.5 坐标变换

坐标变换是一种数学变换，正如绕组折算、频率折算一样，也是一种等效变换。

坐标变换的原则：坐标变换前后，即在不同坐标系下的绕组产生的磁动势相等，有时还要求绕组产生的功率相等。这就是坐标变换的磁动势不变原则和功率不变原则。

电机理论中的坐标变换都是线性变换，即将方程式中原来的一组变量用一组新的变量代替，新旧变量之间的关系是线性关系。

坐标变换的目的是简化，使变换后的数学模型易于处理和应用。

### 1.5.1 多相坐标系

对于  $n$  相对称电机 ( $n \geq 3$ ) 可以通过一个  $n \times n$  实变换矩阵将  $n$  相对称绕组等效为一个两相绕组和一系列“零序绕组”。 $n$  相对称绕组从自然坐标系变换到任意速正交坐标系的广义两轴实变换矩阵为

$$T(\theta) = \sqrt{\frac{2}{n}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/n) & \cdots & \cos(\theta-k \cdot 2\pi/n) & \cdots & \cos[\theta-(n-1) \cdot 2\pi/n] \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-2\pi/n) & \cdots & -\sin(\theta-k \cdot 2\pi/n) & \cdots & -\sin[\theta-(n-1) \cdot 2\pi/n] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \cos\theta & \cos(\theta-i \cdot 2\pi/n) & \cdots & \cos(\theta-i \cdot k \cdot 2\pi/n) & \cdots & \cos[\theta-i \cdot (n-1) \cdot 2\pi/n] \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-i \cdot 2\pi/n) & \cdots & -\sin(\theta-i \cdot k \cdot 2\pi/n) & \cdots & -\sin[\theta-i \cdot (n-1) \cdot 2\pi/n] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \cos\theta & \cos(\theta-m \cdot 2\pi/n) & \cdots & \cos(\theta-m \cdot k \cdot 2\pi/n) & \cdots & \cos[\theta-m \cdot (n-1) \cdot 2\pi/n] \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-m \cdot 2\pi/n) & \cdots & -\sin(\theta-m \cdot k \cdot 2\pi/n) & \cdots & -\sin[\theta-m \cdot (n-1) \cdot 2\pi/n] \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & \cdots & 1/\sqrt{2} & \cdots & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & \cdots & (-1)^{k+1}/\sqrt{2} & \cdots & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

式 (1.1) 中， $n \geq 3$ ； $k=1,2,3,\cdots,n-1$ ； $\theta$  为  $d$  轴与  $A$  相相轴（参考轴线）之间的夹角（参考图 1.1）， $\theta(t)=\theta(0)+\int_0^t \omega(\xi) d\xi$ ， $\omega$  为任意速旋转正交坐标系的旋转角速度；当  $n$  为偶数时； $m=n/2-1$ ，当  $n$  为奇数时， $m=(n-1)/2$ 。

式 (1.1) 同时满足磁动势不变和功率不变约束，即满足

$$T^{-1}(\theta) = T^T(\theta) \quad (1.2)$$

当只满足磁动势不变约束时，式 (1.1) 矩阵前的系数取为  $2/n$ ，矩阵中后两排的系数  $\sqrt{2}$  改为 2，此时式 (1.2) 不成立。

下面着重讨论三相系统的坐标变换，其变换矩阵即可在式 (1.1) 中令  $n=3$  得到。

### 1.5.2 dqn 任意速正交坐标系

记相坐标系为 ABC 坐标系，任意速正交坐标系为 dqn 坐标系 ( $n$  轴垂直于 dq 平面)，二者关系如图 1.1 所示。设通用变量  $f$  为 ABC 坐标系（下标 ABC）和 dqn 坐标系中（下

标 dqn) 的三阶列向量 (定、转子侧电压、电流或磁链) 或向量分量, 则满足功率不变和磁动势不变约束时的变换关系可给出:

$$f_{\text{dqn}} = T(\theta) f_{\text{ABC}}$$

或

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_n \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta+2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-2\pi/3) & -\sin(\theta+2\pi/3) \\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

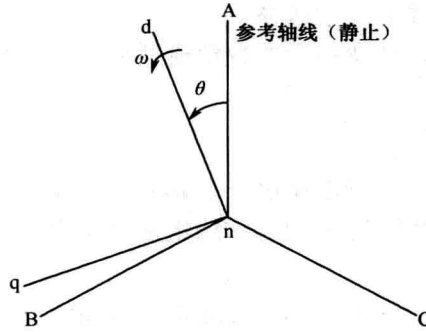


图 1.1 ABC 坐标系与 dqn 坐标系的关系

而反变换为

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin(\theta) & \sqrt{1/2} \\ \cos(\theta-2\pi/3) & -\sin(\theta-2\pi/3) & \sqrt{1/2} \\ \cos(\theta+2\pi/3) & -\sin(\theta+2\pi/3) & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_n \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

式 (1.3) ~ (1.4) 中  $\theta$  为 d 轴与 A 相相轴 (参考轴线) 之间的夹角, 且

$$\theta(t) = \theta(0) + \int_0^t \omega(\xi) d\xi$$

式中,  $\omega$  为 dqn 坐标系的旋转角速度。

对于三相对称分量或三相无中线系统, n 轴分量  $f_n$  恒为零。

在实际应用中, 经常用到只满足磁动势不变约束的坐标变换, 对于 dqn 任意速正交坐标系, 坐标变换关系如下:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_n \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta+2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-2\pi/3) & -\sin(\theta+2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

注意, 有的参考文献定义 n 轴分量为  $f_n = \frac{\sqrt{2}}{3}(f_A + f_B + f_C)$ 。

反变换为

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta-2\pi/3) & -\sin(\theta-2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta+2\pi/3) & -\sin(\theta+2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_n \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

在电机的坐标变换中,要注意坐标轴的选取,通常将 d 轴取得与定子 A 相绕组重合(或超前 A 轴  $\theta$  电角度),而 q 轴按逆时针旋转方向为正方向超前 d 轴  $90^\circ$  电角度放置,如图 1.1 所示。但在有的文献或参考书里,坐标轴的选取有所不同,它们将 q 轴取在超前 A 轴  $\theta$  电角度(或与 A 轴重合)处,而 d 轴按逆时针旋转方向为正方向滞后 q 轴  $90^\circ$  电角度放置,这时的坐标变换关系将与上述有所不同,式 (1.3)、式 (1.4) 和式 (1.5)、式 (1.6) 中正弦项都为正。读者在使用中一定要留意!还要注意,当使用式 (1.3) 和式 (1.5) 进行坐标变换时,电磁转矩表达式前的系数是不同的。

### 1.5.3 $\alpha\beta 0$ 静止正交坐标系

设 dqn 坐标系以零速旋转,即保持静止,且正交坐标系中的参考轴线  $\alpha$  (d 改为  $\alpha$ , q 改为  $\beta$ , n 改为 0) 与相坐标系中的参考轴线 A 重合,即

$$\theta(t)=0 \quad (1.7)$$

则构成普通交流电机分析,尤其是驱动控制系统分析中应用较多的  $\alpha\beta 0$  静止正交坐标系,如图 2.3 所示。此时,  $\alpha\beta 0$  静止正交坐标系与定子静止坐标系 ABC 通用变量间的正、逆变换关系分别为

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

当满足磁动势等效又满足功率不变约束时,对于  $\alpha\beta 0$  静止正交坐标系,由于有  $\theta(t)=0$ ,由式 (1.3) 和式 (1.4) 得到

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & 1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sqrt{1/2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{1/2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

## 1.6 正方向规定

从电路的角度看,变压器和旋转电机都是由两个和两个以上的绕组回路构成的。建立电机的数学模型时,要对每一个回路应用基尔霍夫电压定律列写电压方程,因此,必须首先规定每一个回路中电压、电流、磁通和电动势的正方向(参考方向)。

### 1.6.1 电动机惯例

所谓电动机惯例就是，绕组回路中的电压与电流的正方向为关联方向（绕组从外电路吸取电功率），电流与磁通的正方向符合右手螺旋关系，电机转轴上的电磁转矩的正方向与转子的旋转方向一致，电磁转矩为驱动转矩。图 1.2 为这种正方向规定时的绕组回路示意图。从图 1.2 (b) 可得电压方程和磁链方程分别为

$$u_k = i_k R_k + \frac{d\psi_k}{dt}$$

$$\psi_k = L_k i_k$$

其中， $R_k$  为绕组的电阻； $L_k$  为绕组的电感； $u_k$  为绕组的端电压； $i_k$  为流过绕组的电流； $\psi_k$  为与绕组交链的磁链。

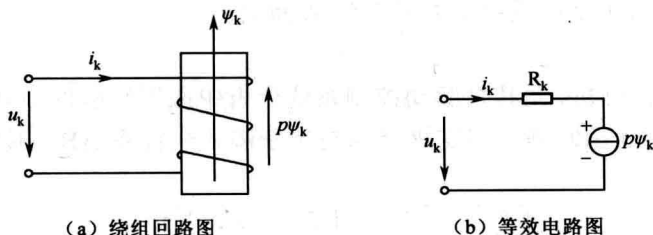


图 1.2 绕组回路及其等效电路（电动机惯例）

### 1.6.2 发电机惯例

所谓发电机惯例就是，绕组回路中的电压与电流的正方向为非关联方向（绕组向外电路发出电功率），电流与磁通的正方向符合左手螺旋关系，电机转轴上的电磁转矩的正方向与转子的旋转方向相反，电磁转矩为制动转矩。图 1.3 为这种正方向规定时的绕组回路示意图。从图 1.3 (b) 可得电压方程和磁链方程分别为

$$u_k = -i_k R_k + \frac{d\psi_k}{dt}$$

$$\psi_k = -L_k i_k$$

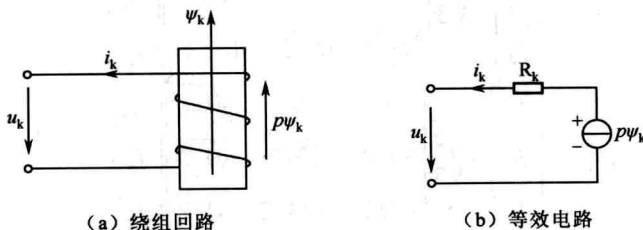


图 1.3 绕组回路及其等效电路（发电机惯例）

## 1.7 标么制

在电气工程的理论分析和设计计算中，经常采用标么制。在标么制中，电压、电流、阻抗和功率等都用标么值表示，标么值的定义为

标么值 = 实际值 / 基值（与实际值同单位）

采用标么制系统时,基值的选取是关键。一般来说,基值可以任意选取,但是为了使计算得以简化,通常选电机的额定值为基值。在电机分析中,基值选取的基本原则是标么值形式的电压方程、磁链方程与采用实际值时相同;在凸极同步电机中还要求标么值表示的方程中互感为可逆。但是,这一原则并非是绝对的,在某些场合下,有时也采用其他的选择方法。

基值分为基本量和导出量两大类,有的以电压基值、电流基值和时间基值为基本量,而功率基值、阻抗基值、磁链基值、速度基值、转矩基值以及惯性常数等可以用基本量导出;有的以功率基值、电压基值和电角速度基值作为基本量,其余的为导出量。下面以后者为例给出三相系统的基值选取。

功率基值的选取有三种方案:以额定输出功率、额定输入功率和额定输入视在功率作为功率的基值。这里,选额定视在功率作为功率基值,即

$$\text{功率基值} \quad P_b = P_N \quad (\text{额定视在功率, VA})$$

$$\text{电压基值} \quad U_b = U_m = \sqrt{2}U_{\varphi N} \quad (\text{相电压幅值, V; } U_{\varphi N} \text{ 为额定相电压})$$

$$\text{角频率基值} \quad \omega_b = 2\pi f_N \quad (\text{rad/s}) \quad (f_N \text{ 为电源额定频率, Hz})$$

由上面的基值基本量导出其余基值:

$$\text{时间基值} \quad t_b = 1/\omega_b \quad (\text{s})$$

在实际中,采取标么值形式的数学模型分析电机瞬态时,时间  $t$  常用实际值表示,其他各量用标么值表示,即所谓的混合标么值系统。

$$\text{电流基值} \quad I_b = \frac{2P_b}{3U_b} \quad (\text{相电流幅值, A})$$

$$\text{阻抗基值} \quad Z_b = \frac{U_b}{I_b} = \frac{3U_b}{2P_b} \quad (\Omega)$$

$$\text{磁链基值} \quad \psi_b = \frac{U_b}{\omega_b} \quad (\text{Wb})$$

$$\text{电感基值} \quad L_b = \frac{Z_b}{\omega_b} \quad (\text{H})$$

$$\text{机械角速度基值} \quad \omega_{mb} = \frac{\omega_b}{n_p} \quad (n_p \text{ 为电机磁极对数, rad/s})$$

$$\text{转矩基值} \quad T_b = \frac{P_b}{\omega_{mb}} = n_p \frac{P_b}{\omega_b} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$\text{转动惯量基值} \quad J_b = \frac{P_b}{\omega_{mb}^2} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

$$\text{惯性常数} \quad H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_{mb}^2}{P_b} \quad (\text{s}) \quad (\text{基值速度下的转子动能与功率基值之比})$$

对于同步电机,经过 dq0 变换后得到的磁链方程中的电感矩阵的定、转子互感是不可逆的,引入标么值可解决这个问题,但是,转子各绕组的基值电流和基值电压的乘积,必须满足一定的约束。

关于同步电机转子基值电流的选取。首先确定转子电流的基值,随之可以确定转子各派生量的基值。

通常,工程上所用到的转子电流的基值有四种:  $X_{ad}$  基值;互感相等基准;磁动势基准;空载额定电压基准。其中以第一种用得最多,简单介绍如下:

所谓  $X_{ad}$  基准是指励磁绕组通入基值电流  $i_{fb}$  时所产生的定子互感磁链  $M_{af}i_{fb}$ , 恰好与定子三相绕组通入对称的直轴基值电流  $i_b$  时所产生的直轴电枢反应磁链  $L_{ab}i_b$  相等, 即

$$M_{af}i_{fb} = L_{ab}i_b$$

类似地,可以定义直轴和基值阻尼绕组的基值电流  $i_{Db}$  和  $i_{Qb}$ , 即

$$M_{aD}i_{Db} = L_{ad}i_b, \quad M_{aQ}i_{Qb} = L_{ad}i_b$$

转子励磁绕组电压、磁链、电感和阻抗的基值分别为

$$u_{fb} = \frac{3}{2}u_b \frac{i_b}{i_{fb}}; \quad \psi_{fb} = \frac{3}{2}\psi_b \frac{i_b}{i_{fb}}; \quad L_{fb} = \frac{3}{2}L_b \frac{i_b}{i_{fb}}; \quad Z_{fb} = \frac{3}{2}Z_b \frac{i_b}{i_{fb}}$$

同理,可以导出直轴和交轴阻尼绕组的电压基值、磁链基值、电感基值和阻抗基值。

## 1.8 Matlab 软件简介

本书使用 Matlab 软件对电机的瞬态过程进行仿真分析。Matlab 是近年来应用广泛、性能卓越的科学计算工具软件,它集数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示于一体,构成了一个操作方便、界面友好的系统仿真和 CAD 平台。Matlab 软件中提供了很多具有源程序的开放性和功能齐备的工具箱,例如,信号处理、控制系统、神经网络、图像处理、系统辨识、最优化分析与综合、模糊逻辑、小波变换等工具箱。人们可直观而方便地利用它们进行分析、计算及设计工作,从而大大节省时间。

Matlab 的另一个显著特点,就是提供了系统动态仿真工具箱——Simulink。Simulink 由模块库、模型构造及指令分析和演示程序组成,是一个模块化、模型化的系统动态仿真环境。Simulink 既保留了编程方式的优点,又克服了编程方式的缺点,用户只要从模块库中拖放合适的模块组合在一起即可实现系统仿真,方便易学。通过 Simulink 可以对电气、机械,以及通信等的连续、离散或混合系统进行深入的系统建模、仿真与分析研究。

### S 函数简介

S 函数即系统函数 (System Function) 的意思。对于有些复杂的算法若用普通的 Simulink 模块来搭建仿真模型,有可能难以实现或显得非常烦琐,这时可采用编程的形式设计出 S 函数模块,将其嵌入到系统中来建立仿真模型。如果恰当地使用 S 函数,理论上,可以在 Simulink 下对任意复杂的系统进行仿真。

S 函数具有固定的程序格式,用 Matlab 语言可以编写 S 函数,此外还允许用户使用 C、C++、Fortran 和 Ada 等语言进行编写,用非 Matlab 语言进行编写时,需要采用编译器生成动态链接库 DLL 文件。

在主窗口中输入 sfundemos,或者单击 Simulink->User-Defined Functions->S-Function Examples,即可出现如图 1.4 所示的界面,可以选择对应的编程语言查看演示文件。