



现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB仿真

袁 雷 胡冰新 魏克银 陈 姝 编著

51.012

2



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真

袁 雷 胡冰新 魏克银 陈 姝 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书着眼于现代永磁同步电机控制原理分析及 MATLAB 仿真应用,系统地介绍了永磁同步电机控制系统的基本理论、基本方法和应用技术。全书分为 3 部分共 10 章,主要内容包括三相永磁同步电机的数学建模及矢量控制技术、三相电压源逆变器 PWM 技术、三相永磁同步电机的直接转矩控制、三相永磁同步电机的无传感器控制技术、六相永磁同步电机的数学建模及矢量控制技术、六相电压源逆变器 PWM 技术和五相永磁同步电机的数学建模及矢量控制技术等。每种控制技术都通过了 MATLAB 仿真建模并进行了仿真分析。本书各部分既有联系又相互独立,读者可根据自己的需要选择学习。

本书可作为从事电气传动自动化、永磁同步电机控制、电力电子技术的工程技术人员的参考书,也可作为大专院校相关专业的教师、研究生和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真 / 袁雷等
编著. -- 北京:北京航空航天大学出版社,2016.3
ISBN 978-7-5124-2057-1

I. ①现… II. ①袁… III. ①永磁同步电机—控制系
统一系统仿真—Matlab 软件 IV. ①TM351.012

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 040492 号

版权所有,侵权必究。

现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真

袁 雷 胡冰新 魏克银 陈 姝 编著

责任编辑 孙兴芳

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话:(010)82316936

北京市同江印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:17.5 字数:373 千字

2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2057-1 定价:45.00 元

前 言

与传统的电励磁同步电机相比,永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有结构简单、运行可靠、体积小、质量轻、损耗小、效率高,以及电机的形状和尺寸可以灵活多样等显著优点。近年来,随着材料技术的不断发展,永磁材料性能的不断提高,以及永磁电机控制技术的不断成熟,PMSM 已经在民用、航天和军事等领域得到了广泛应用。然而,PMSM 是一个多变量、强耦合、非线性和变参数的复杂对象,为了获得较好的控制性能,需要对其采用一定的控制算法。随着现代控制理论不断发展,近年来有关 PMSM 控制算法的研究已经成为研究热点,并已有大量文献发表在国内外学术期刊和专著上。因此,为了使广大工程技术人员能够充分了解、掌握和应用这一领域的最新技术,学会用 MATLAB 仿真软件进行相关 PMSM 控制算法的设计,作者编写了本书,以抛砖引玉,供广大读者学习参考。

本书是在总结作者多年研究成果的基础上,进一步理论化、系统化和实用化而形成的;是基于目前较为先进的 MATLAB 2014b 仿真软件,在总体上按照由浅入深、由易到难的原则进行编写的。本书具有如下特点:

① 对三相和多相 PMSM 控制算法进行详细的剖析,将传统控制算法与改进控制算法相结合,并介绍一些近年来相关文献提出的有价值的新思想、新方法和新技术,取材新颖,内容先进。

② 针对每一种 PMSM 控制算法都给出了完整的 MATLAB 仿真建模方法,同时给出了程序的说明和仿真结果,为读者提供了有益的借鉴。

③ 所给出的各种 PMSM 控制算法描述完整,出处明了,并且仿真模型设计结构采用模块化方法,便于读者自学和二次开发。

④ 章节内容相对独立,便于读者根据自身的研究方向进行深入的研究。

本书分为 3 部分共 10 章。第 1 部分为基础篇,包括第 1~4 章,第 1 章介绍三相 PMSM 的数学建模方法,第 2 章介绍三相电压源逆变器 PWM 技术,第 3 章介绍几种常用的三相 PMSM 矢量控制 MATLAB 仿真建模方法,第 4 章介绍三相 PMSM 的直接转矩控制 MATLAB 仿真建模方法。第 2 部分为进阶篇,包括第 5 章和第 6 章,第 5 章介绍基于基波数学模型的三相 PMSM 无传感器控制 MATLAB 仿真建模方法,第 6 章介绍基于高频信号注入的三相 PMSM 无传感器控制 MATLAB 仿真建模方法。第 3 部分为高级篇,包括第 7~10 章,第 7 章介绍六相 PMSM 的数学建模方法,第 8 章介绍六相电压源逆变器 PWM 技术 MATLAB 仿真建模方法,第 9 章介

前 言

绍六相 PMSM 矢量控制 MATLAB 仿真建模方法,第 10 章介绍五相 PMSM 的数学建模及矢量控制 MATLAB 仿真建模方法。

本书可作为从事电气传动自动化、永磁同步电机控制、电力电子技术的工程技术人员参考书,也可作为大专院校相关专业的教师、研究生和高年级本科生的参考书。

在本书出版之际,感谢北京航空航天大学出版社的编辑老师为本书付出的辛勤劳动,感谢身边朋友们的关心和帮助,感谢家人的理解和支持。

由于作者水平有限,书中难免存在一些不足和错误之处,欢迎广大读者批评指正。假如您对控制算法和仿真模型有疑问,请通过 E-mail 与作者联系,E-mail 地址为 lei.yuan.v@qq.com。

袁 雷

2015 年 10 月于南京

目 录

第 1 部分 基础篇

| | |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 三相永磁同步电机的数学建模 | 3 |
| 1.1 三相 PMSM 的基本数学模型 | 3 |
| 1.2 三相 PMSM 的坐标变换 | 5 |
| 1.2.1 Clark 变换与仿真建模 | 5 |
| 1.2.2 Park 变换与仿真建模 | 7 |
| 1.2.3 两种常用坐标系之间的关系 | 9 |
| 1.3 同步旋转坐标系下的数学建模 | 10 |
| 1.3.1 数学建模 | 10 |
| 1.3.2 仿真建模 | 12 |
| 1.4 静止坐标系下的数学建模 | 22 |
| 1.4.1 数学建模 | 22 |
| 1.4.2 仿真建模 | 24 |
| 参考文献 | 25 |
| 第 2 章 三相电压源逆变器 PWM 技术 | 27 |
| 2.1 三相电量的空间矢量表示 | 27 |
| 2.2 SVPWM 算法的合成原理 | 31 |
| 2.2.1 基于软件模式的合成 | 33 |
| 2.2.2 基于硬件模式的合成 | 34 |
| 2.3 SVPWM 算法的实现 | 36 |
| 2.3.1 参考电压矢量的扇区判断 | 36 |
| 2.3.2 非零矢量和零矢量作用时间的计算 | 37 |
| 2.3.3 扇区矢量切换点的确定 | 38 |
| 2.4 SVPWM 算法的建模与仿真 | 39 |
| 2.4.1 基于 Simulink 的仿真建模 | 39 |

目 录

| | | |
|--------------|------------------------|-----------|
| 2.4.2 | 基于 s 函数的仿真建模 | 43 |
| 2.4.3 | 基于 SVPWM 模块的仿真建模 | 51 |
| 2.5 | SPWM 算法的实现 | 56 |
| 2.5.1 | 常规 SPWM 算法的实现 | 56 |
| 2.5.2 | 基于三次谐波注入的 SPWM 算法的实现 | 59 |
| 2.5.3 | 基于零序分量注入的 SPWM 算法的实现 | 62 |
| | 参考文献 | 65 |
| 第 3 章 | 三相永磁同步电机的矢量控制 | 66 |
| 3.1 | PMSM 的滞环电流控制 | 66 |
| 3.1.1 | 滞环电流控制的基本原理 | 66 |
| 3.1.2 | 仿真建模与结果分析 | 67 |
| 3.2 | PMSM 的 PI 电流控制 | 70 |
| 3.2.1 | 转速环 PI 调节器的参数整定 | 70 |
| 3.2.2 | 电流环 PI 调节器的参数整定 | 72 |
| 3.3 | 基于 PI 调节器的 PMSM 矢量控制 | 75 |
| 3.3.1 | 仿真建模 | 75 |
| 3.3.2 | 仿真结果分析 | 79 |
| 3.4 | 基于滑模速度控制器的 PMSM 矢量控制 | 80 |
| 3.4.1 | 滑模控制的基本原理 | 80 |
| 3.4.2 | 滑模速度控制器的设计 | 82 |
| 3.4.3 | 仿真建模与结果分析 | 83 |
| 3.5 | 静止坐标系下的 PMSM 矢量控制 | 86 |
| 3.5.1 | 比例谐振控制的基本原理 | 86 |
| 3.5.2 | 基于比例谐振控制的矢量控制器设计 | 90 |
| 3.5.3 | 仿真建模与结果分析 | 91 |
| | 参考文献 | 94 |
| 第 4 章 | 三相永磁同步电机的直接转矩控制 | 95 |
| 4.1 | PMSM 直接转矩控制原理 | 95 |
| 4.1.1 | 三相电压源逆变器的工作原理 | 97 |
| 4.1.2 | 磁链和转矩控制原理 | 98 |
| 4.1.3 | 直接转矩控制开关表的选择 | 99 |
| 4.2 | 传统直接转矩控制 MATLAB 仿真 | 100 |
| 4.2.1 | 仿真建模 | 100 |
| 4.2.2 | 仿真结果分析 | 105 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| 4.3 基于滑模控制的直接转矩控制 | 106 |
| 4.3.1 PMSM 的矢量数学模型 | 107 |
| 4.3.2 基于滑模控制的直接转矩控制器设计 | 107 |
| 4.4 基于滑模控制的直接转矩控制的 MATLAB 仿真 | 109 |
| 4.4.1 仿真建模 | 109 |
| 4.4.2 仿真结果分析 | 111 |
| 参考文献 | 113 |

第 2 部分 进阶篇

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 第 5 章 基于基波数学模型的三相永磁同步电机无传感器控制 | 117 |
| 5.1 传统滑模观测器算法 | 117 |
| 5.1.1 传统滑模观测器设计 | 117 |
| 5.1.2 基于反正切函数的转子位置估计 | 119 |
| 5.1.3 基于锁相环的转子位置估计 | 120 |
| 5.1.4 基于反正切函数的仿真建模与结果分析 | 122 |
| 5.1.5 基于锁相环的仿真建模与结果分析 | 122 |
| 5.2 自适应滑模观测器算法 | 132 |
| 5.2.1 自适应滑模观测器设计 | 132 |
| 5.2.2 仿真建模与结果分析 | 134 |
| 5.3 同步旋转坐标系下滑模观测器算法 | 138 |
| 5.3.1 滑模观测器设计 | 138 |
| 5.3.2 基于锁相环的转子位置估计 | 140 |
| 5.3.3 仿真建模与结果分析 | 142 |
| 5.4 模型参考自适应系统 | 147 |
| 5.4.1 参考模型与可调模型的确定 | 148 |
| 5.4.2 参考自适应律的确定 | 149 |
| 5.4.3 仿真建模与结果分析 | 151 |
| 5.5 扩展卡尔曼滤波器算法 | 151 |
| 5.5.1 PMSM 的数学建模 | 155 |
| 5.5.2 扩展卡尔曼滤波器的状态估计 | 157 |
| 5.5.3 仿真建模与结果分析 | 158 |
| 参考文献 | 164 |
| 第 6 章 基于高频信号注入的三相永磁同步电机无传感器控制 | 166 |
| 6.1 高频激励下的三相 PMSM 数学模型 | 166 |

| | | |
|-------|------------------------------|-----|
| 6.2 | 高频载波信号的选择 | 167 |
| 6.3 | 旋转高频电压信号注入法 | 168 |
| 6.3.1 | 旋转高频电压激励下三相 PMSM 的电流响应 | 168 |
| 6.3.2 | 凸极跟踪转子位置估计方法 | 169 |
| 6.3.3 | 仿真建模与结果分析 | 171 |
| 6.4 | 脉振高频电压信号注入法 | 175 |
| 6.4.1 | 脉振高频电压激励下三相 PMSM 的电流响应 | 175 |
| 6.4.2 | 转子位置估计方法 | 177 |
| 6.4.3 | 仿真建模与结果分析 | 178 |
| | 参考文献 | 181 |

第 3 部分 高级篇

| | | |
|-------|----------------------------|-----|
| 第 7 章 | 六相永磁同步电机的数学建模 | 185 |
| 7.1 | 多相 PMSM 的数学模型 | 185 |
| 7.2 | 六相 PMSM 的基本数学模型 | 187 |
| 7.3 | 两种常用坐标变换之间的关系 | 190 |
| 7.3.1 | 双 $d-q$ 坐标变换 | 190 |
| 7.3.2 | 矢量空间解耦坐标变换 | 193 |
| 7.3.3 | 两种坐标变换之间的关系 | 195 |
| 7.4 | 同步旋转坐标系下的数学模型 | 197 |
| 7.4.1 | 基于双 $d-q$ 坐标变换的数学模型 | 197 |
| 7.4.2 | 基于矢量空间解耦变换的数学模型 | 202 |
| | 参考文献 | 204 |
| 第 8 章 | 六相电压源逆变器 PWM 技术 | 206 |
| 8.1 | 多相电压源逆变器 PWM 算法 | 206 |
| 8.2 | 传统的两矢量六相 SVPWM 算法 | 207 |
| 8.2.1 | 六相电压源逆变器的电压矢量 | 207 |
| 8.2.2 | 传统的两矢量六相 SVPWM 算法的实现 | 209 |
| 8.3 | 四矢量 SVPWM 算法 | 211 |
| 8.3.1 | 四矢量 SVPWM 算法的实现 | 211 |
| 8.3.2 | 仿真建模 | 216 |
| 8.4 | 三相解耦 PWM 算法 | 222 |
| 8.4.1 | 三相解耦 PWM 算法的实现 | 222 |
| 8.4.2 | 仿真建模 | 223 |

| | |
|---|------------|
| 8.5 基于双零序信号注入的 PWM 算法 | 225 |
| 8.5.1 基于双零序信号注入的 PWM 算法的实现 | 225 |
| 8.5.2 仿真建模 | 226 |
| 参考文献 | 229 |
| 第 9 章 六相永磁同步电机的矢量控制 | 231 |
| 9.1 多相电机矢量控制 | 231 |
| 9.2 六相 PMSM 传统矢量控制 | 233 |
| 9.2.1 传统矢量控制原理 | 233 |
| 9.2.2 仿真建模与结果分析 | 234 |
| 9.3 基于 VSD 坐标变换的六相 PMSM 矢量控制 | 239 |
| 9.3.1 基于 VSD 坐标变换的六相 PMSM 矢量控制原理 | 239 |
| 9.3.2 仿真建模与结果分析 | 240 |
| 9.4 基于双 $d-q$ 坐标变换的六相 PMSM 矢量控制 | 240 |
| 9.4.1 基于双 $d-q$ 坐标变换的六相 PMSM 矢量控制原理 | 240 |
| 9.4.2 仿真建模与结果分析 | 244 |
| 9.5 两种矢量控制策略之间的关系 | 248 |
| 9.6 静止坐标系下六相 PMSM 矢量控制 | 249 |
| 9.6.1 静止坐标系下六相 PMSM 矢量控制的基本原理 | 249 |
| 9.6.2 仿真建模与结果分析 | 250 |
| 参考文献 | 256 |
| 第 10 章 五相永磁同步电机的数学建模与矢量控制 | 257 |
| 10.1 五相 PMSM 的基本数学模型 | 257 |
| 10.2 五相 PMSM 的坐标变换 | 259 |
| 10.2.1 坐标变换 | 259 |
| 10.2.2 仿真建模 | 260 |
| 10.3 同步旋转坐标系下的数学模型 | 261 |
| 10.3.1 数学模型 | 261 |
| 10.3.2 仿真建模 | 262 |
| 10.4 五相 PMSM 矢量控制仿真 | 265 |
| 参考文献 | 268 |

第 1 部分 基础篇

三相永磁同步电机的数学建模

三相永磁同步电机(PMSM)是一个强耦合、复杂的非线性系统,为了更好地设计先进的 PMSM 控制算法,建立合适的数学模型就显得尤为重要。本章主要介绍三相 PMSM 的基本数学模型和各个坐标变换之间的关系,指出两种常用坐标系变换之间的区别与联系;同时分别建立同步旋转坐标系和静止坐标系下的三相 PMSM 数学模型;最后给出几种常用的同步旋转坐标系下数学模型的 MATLAB 仿真建模方法,以及静止坐标系下数学模型的仿真建模方法。

1.1 三相 PMSM 的基本数学模型

当三相 PMSM 转子磁路的结构不同时,电机的运行性能、控制方法、制造工艺和适用场合也会不同。目前,根据永磁体转子上的位置不同,三相 PMSM 的转子结构可以分为表贴式和内置式两种结构,具体如图 1-1 所示。

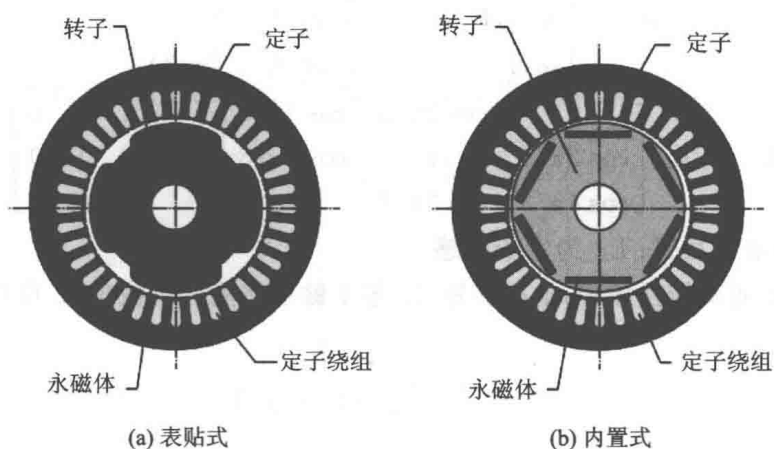


图 1-1 三相 PMSM 的转子结构

对于表贴式转子结构而言,由于其具有结构简单、制造成本低和转动惯量小等优点,在恒功率运行范围不宽的三相 PMSM 和永磁无刷直流电机中得到广泛应用。表贴式转子结构中的永磁磁极易于实现最优设计,能使电机的气隙磁密波形趋于正弦波分布,进而提高电机的运行性能。内置式转子结构可以充分利用转子磁路不对称

所产生的磁阻转矩,提高电机的功率密度,使得电机的动态性能较表贴式转子结构有所改善,制造工艺也较简单,但漏磁系数和制造成本都较表贴式转子结构大。对于采用稀土永磁材料的电机来说,由于永磁材料的磁导率接近1,所以表贴式转子结构在电磁性能上属于隐极转子结构;而内置式转子结构相邻永磁磁极间有着磁导率很大的铁磁材料,在电磁性能上属于凸极转子结构。为了简化分析,假设三相PMSM为理想电机,且满足下列条件:

- ① 忽略电机铁芯的饱和;
- ② 不计电机中的涡流和磁滞损耗;
- ③ 电机中的电流为对称的三相正弦波电流。

这样,自然坐标系下PMSM的三相电压方程为^[1-2]

$$\mathbf{u}_{3s} = \mathbf{R}\mathbf{i}_{3s} + \frac{d}{dt}\boldsymbol{\psi}_{3s} \quad (1-1)$$

磁链方程为

$$\boldsymbol{\psi}_{3s} = \mathbf{L}_{3s}\mathbf{i}_{3s} + \boldsymbol{\psi}_f \cdot \mathbf{F}_{3s}(\theta_e) \quad (1-2)$$

其中: $\boldsymbol{\psi}_{3s}$ 为三相绕组的磁链; \mathbf{u}_{3s} 、 \mathbf{R} 、 \mathbf{i}_{3s} 分别为三相绕组的相电压、电阻和电流; \mathbf{L}_{3s} 为三相绕组的电感; $\mathbf{F}_{3s}(\theta_e)$ 为三相绕组的磁链,且满足

$$\mathbf{i}_{3s} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{3s} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}, \boldsymbol{\psi}_{3s} = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}_{3s} = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}, \mathbf{F}_{3s}(\theta_e) = \begin{bmatrix} \sin \theta_e \\ \sin(\theta_e - 2\pi/3) \\ \sin(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_{3s} = L_{m3} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\pi/3 & \cos 4\pi/3 \\ \cos 2\pi/3 & 1 & \cos 2\pi/3 \\ \cos 4\pi/3 & \cos 2\pi/3 & 1 \end{bmatrix} + L_{l3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中: L_{m3} 为定子互感; L_{l3} 为定子漏感。

根据机电能量转换原理,电磁转矩 T_e 等于磁场储能对机械角 θ_m 位移的偏导,因此有

$$T_e = \frac{1}{2} p_n \frac{\partial}{\partial \theta_m} (\mathbf{i}_{3s}^T \cdot \boldsymbol{\psi}_{3s}) \quad (1-3)$$

其中: p_n 为三相PMSM的极对数。

另外,电机的机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (1-4)$$

其中: ω_m 为电机的机械角速度; J 为转动惯量; B 为阻尼系数; T_L 为负载转矩。

从上面的推导可以看出,式(1-1)~式(1-4)构成了三相PMSM在自然坐标系

下的基本数学模型。由磁链方程可以看出,定子磁链是转子位置角 θ_e 的函数;另外,电磁转矩的表达式也过于复杂。因此,三相 PMSM 的数学模型是一个比较复杂且强耦合的多变量系统。为了便于后期控制器的设计,必须选择合适的坐标变换对数学模型进行降阶和解耦变换。

1.2 三相 PMSM 的坐标变换

为了简化自然坐标系下三相 PMSM 的数学模型,采用的坐标变换通常包括静止坐标变换(Clark 变换)和同步旋转坐标变换(Park 变换)。它们之间的坐标关系如图 1-2 所示,其中 ABC 为自然坐标系, α - β 为静止坐标系, d - q 为同步旋转坐标系^[3]。下文将详细介绍各坐标变换之间的关系。值得说明的是,若没有特殊说明,本书所采用的三相 PMSM 的建模方法都是基于图 1-2 所示的坐标系。

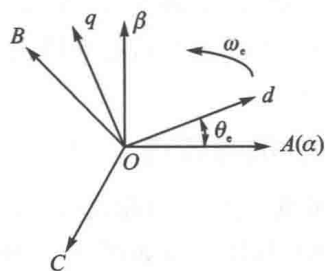


图 1-2 各坐标系之间的关系

1.2.1 Clark 变换与仿真建模

1. Clark 变换

将自然坐标系 ABC 变换到静止坐标系 α - β 的坐标变换为 Clark 变换,根据图 1-2 所示各坐标系之间的关系,可以得出如式(1-5)所示的坐标变换公式:

$$[f_\alpha \quad f_\beta \quad f_0]^T = \mathbf{T}_{3s/2s} [f_A \quad f_B \quad f_C]^T \quad (1-5)$$

其中: f 代表电机的电压、电流或磁链等变量; $\mathbf{T}_{3s/2s}$ 为坐标变换矩阵,可表示为

$$\mathbf{T}_{3s/2s} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

将静止坐标系 α - β 变换到自然坐标系 ABC 的坐标变换称为反 Clark 变换,可以表示为

$$[f_A \quad f_B \quad f_C]^T = \mathbf{T}_{2s/3s} [f_\alpha \quad f_\beta \quad f_0]^T \quad (1-7)$$

其中: $\mathbf{T}_{2s/3s}$ 为坐标变换矩阵,可表示为

$$\mathbf{T}_{2s/3s} = \mathbf{T}_{3s/2s}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

以上简单分析了自然坐标系中的变量与静止坐标系中的变量之间的关系,变换矩阵前的系数为 $2/3$,是根据幅值不变作为约束条件得到的;当采用功率不变作为约束条件时,该系数变为 $\sqrt{2/3}$ 。若没有特殊说明,本书均采用幅值不变作为约束条件。特别地,对于三相对称系统而言,在计算静止坐标系下的变量时,零序分量 f_0 可以忽略不计。

2. 仿真建模

根据式(1-5)和式(1-7),可以使用 MATLAB/Simulink 中的Fcn 模块搭建仿真模型,具体模型如图 1-3 所示。另外,公式中的变量 α 、 β 分别用图中的 Alpha 和 Beta 表示。

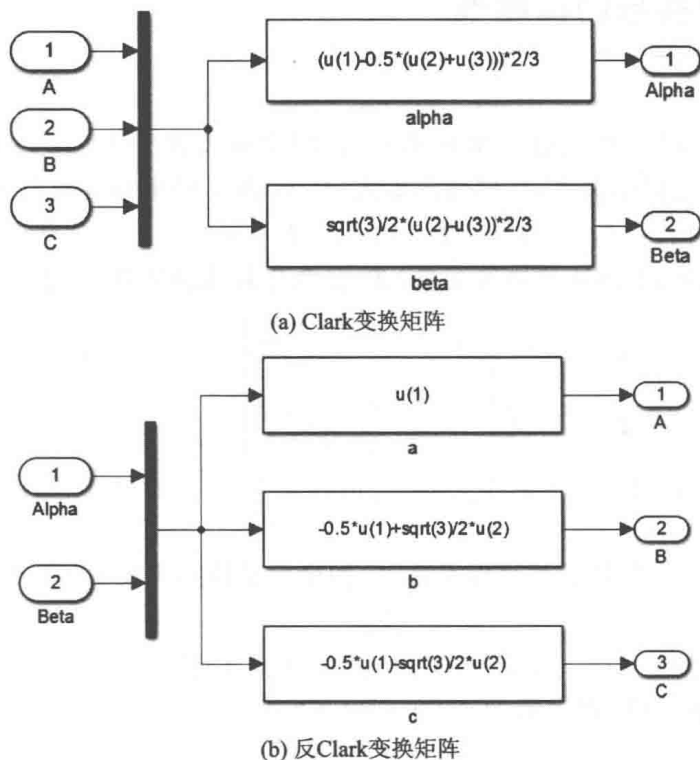


图 1-3 自然坐标系与静止坐标系之间的变换关系

1.2.2 Park 变换与仿真建模

1. Park 变换

将静止坐标系 $\alpha - \beta$ 变换到同步旋转坐标系 $d - q$ 的坐标变换称为 Park 变换, 根据图 1-2 所示各坐标系之间的关系, 可以得出如式(1-9)所示的坐标变换公式:

$$[f_d \quad f_q]^T = \mathbf{T}_{2s/2r} [f_\alpha \quad f_\beta]^T \quad (1-9)$$

其中: $\mathbf{T}_{2s/2r}$ 为坐标变换矩阵, 可表示为

$$\mathbf{T}_{2s/2r} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (1-10)$$

将同步旋转坐标系 $d - q$ 变换到静止坐标系 $\alpha - \beta$ 的坐标变换称为反 Park 变换, 可表示为

$$[f_\alpha \quad f_\beta]^T = \mathbf{T}_{2r/2s} [f_d \quad f_q]^T \quad (1-11)$$

其中: $\mathbf{T}_{2r/2s}$ 为坐标变换矩阵, 可表示为

$$\mathbf{T}_{2r/2s} = \mathbf{T}_{2s/2r}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (1-12)$$

将自然坐标系 ABC 变换到同步旋转坐标系 $d - q$, 各变量具有如下关系:

$$[f_d \quad f_q \quad f_0]^T = \mathbf{T}_{3s/2r} [f_A \quad f_B \quad f_C]^T \quad (1-13)$$

其中: $\mathbf{T}_{3s/2r}$ 为坐标变换矩阵, 可表示为

$$\mathbf{T}_{3s/2r} = \mathbf{T}_{3s/2s} \cdot \mathbf{T}_{2s/2r} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos(\theta_e - 2\pi/3) & \cos(\theta_e + 2\pi/3) \\ -\sin \theta_e & -\sin(\theta_e - 2\pi/3) & -\sin(\theta_e + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (1-14)$$

将同步旋转坐标系 $d - q$ 变换到自然坐标系 ABC , 各变量具有如下关系:

$$[f_A \quad f_B \quad f_C]^T = \mathbf{T}_{2r/3s} [f_d \quad f_q \quad f_0]^T \quad (1-15)$$

其中: $\mathbf{T}_{2r/3s}$ 为坐标变换矩阵, 可表示为

$$\mathbf{T}_{2r/3s} = \mathbf{T}_{3s/2r}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e & 1/2 \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) & -\sin(\theta_e - 2\pi/3) & 1/2 \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) & -\sin(\theta_e + 2\pi/3) & 1/2 \end{bmatrix} \quad (1-16)$$

以上简单分析了同步旋转坐标系与静止坐标系中各变量之间的关系, 变换矩阵前的系数为 $2/3$, 是根据幅值不变作为约束条件得到的; 当采用功率不变作为约束条件时, 该系数变为 $\sqrt{2/3}$ 。特别地, 对于三相对称系统而言, 在计算时零序分量 f_0 可以忽略不计。

2. 仿真建模

根据式(1-9)、式(1-11), 以及式(1-13)和式(1-15), 使用 MATLAB/Simulink 中的 Fcn 模块分别搭建静止坐标系与同步旋转坐标系之间坐标变换关系的仿真模型, 以及