

South Africa National Research Foundation
河南省国际合作科研基金
河南理工大学博士基金
河南省高等学校控制工程重点学科开放实验室

资助项目

六相交流感应电机 新颖控制策略研究

Novel Direct Field and Torque Control of
Six-Phase Induction Machine with Special
Phase Current Waveform

艾永乐

Kamper Maarten J. 著

王玉梅



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



South Africa National Research Foundation
河南省国际合作科研基金
河南理工大学博士基金
河南省高等学校控制工程重点学科开放实验室

资助项目

六相交流感应电机 新颖控制策略研究

Novel Direct Field and Torque Control of
Six-Phase Induction Machine with Special
Phase Current Waveform

艾永乐

Kamper Maarten J. 著

王玉梅

蓝益鹏 主审



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

多相感应电机是近几年国际上掀起热潮的一个国际前沿领域,·对多相感应电机的控制更是大家关注的焦点。本书主要对六相感应电机的性能进行研究,通过在电机定子侧注入特殊的梯形波相电流,把定子绕组分为励磁绕组和转矩绕组,从而模拟直流电机实现励磁磁场和转矩磁场的直接控制。利用有限元分析软件和 MATLAB 仿真软件,根据创建的六相感应电机实验系统,验证了在梯形波相电流驱动下小型(2kW)2 极六相感应电机性能。附录中还详细给出了实验数据和系统装配图。

本书可作为高等院校自动化、机电工程等专业的研究生以及从事电机电器性能研究、设计和应用的科学技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

六相交流感应电机新颖控制策略研究/艾永乐,(美)坎珀(Kamper, M. J.)著. —北京:中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-9091-8

I. 六… II. ①艾…②坎… III. 感应电机-控制-研究
IV. TM346

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 113515 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 8.25 印张 171 千字

定价 26.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

颖 控制策略研究
六相交流感应电机新

生的合成磁场强度和磁通密度。研究表明,六相感应电机在梯形波相电流驱动下,气隙中产生了近似于方波的旋转磁场。这种近似于方波的旋转磁场对感应电机的良性运行是非常重要的。通过理论分析和计算,得到了六相感应电机的电磁转矩方程。在考虑磁饱和的情况下,采用近似磁路计算方法来分析计算气隙磁通密度和励磁电流的关系;分析和计算了气隙磁动势的谐波和每相的自感和互感以及绕组函数。在有限元分析中,特别关注磁动势平衡条件以及每相等效电路的建模问题。

通过 MATLAB 仿真和所创建的六相感应电机实验系统,验证了在梯形波相电流驱动下小型(2kW)2极六相感应电机性能。结果表明,理论分析计算的结果和有限元分析计算的结果以及实验测量结果是一致的。仿真结果和实验测量出的转矩和转矩电流的线性关系表明,六相感应电机驱动控制器在磁动势平衡条件下,这种线性关系不受负载的影响。研究还表明,在该梯形波相电流控制下六相感应电机电磁转矩的响应速度是较快的。

本书第1章简要介绍了多相感应电机的发展历程及优缺点。第2章简要介绍了矢量控制和六相感应电机控制的相关知识。第3章主要介绍了六相感应电机的模型和原理,并从理论上分析、评价了六相感应电机的电磁转矩性能。第4章主要应用有限元软件来分析六相感应电机的性能。第5章应用 MATLAB/SIMULINK 软件建立六相感应电机的模型,并对驱动器性能进行仿真。第6章主要测试小型六相感应电机驱动系统的性能,并将实验测试结果和仿真计算的结果进行对比研究,结果表明多相感应电机驱动系统比传统的三相电机驱动系统具有较多优势。这些优点包括:转矩脉动振幅的降低和频率的增大;转子谐波电流减小;在保持相电压不变的情况下,降低了相电流,增强了电机运行的可靠性。

在本书的编写过程中,感谢沈阳工业大学蓝益鹏副教授对本书进行审阅并提出宝贵意见,并感谢郭宇、牛联波和艾宝在编写出版过程中所做的大量工作。

由于作者水平有限,书中难免有遗漏与不当之处,恳请各位专家和广大读者批评指正,并提出宝贵意见。

作者

2009年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1. 1 对调速驱动系统的评价	1
1. 1. 1 传统电机驱动系统	1
1. 1. 2 多相感应电机调速系统	2
1. 2 存在的问题	3
1. 3 解决的方法	3
第 2 章 多相感应电机理论与控制	5
2. 1 电磁转矩的产生机理	5
2. 1. 1 直流电机的电磁转矩产生机理	5
2. 1. 2 感应电机的电磁转矩产生机理	6
2. 1. 3 电磁转矩方程表达形式	7
2. 1. 4 总结	8
2. 2 六相感应电机及控制系统	9
2. 2. 1 多相感应电机驱动系统	9
2. 2. 2 六相感应电机的分类	10
2. 2. 3 六相感应电机的建模	11
2. 2. 4 六相感应电机的控制	13
2. 3 结论	16
第 3 章 梯形波相电流驱动的六相感应电动机运行原理	18
3. 1 引言	18
3. 2 六相电流波形构建	19
3. 3 磁通密度分析	21
3. 4 电磁转矩分析	25
3. 5 静态电磁转矩计算	27

3.6	励磁磁路分析	29
3.7	励磁磁动势的时空谐波分析	30
3.7.1	六相电流时间谐波分析	31
3.7.2	仅考虑励磁电流时磁动势谐波分析	33
3.8	定子电感计算	34
3.9	结束语	38
第4章	六相感应电动机的有限元分析	39
4.1	六相感应电机有限元建模	39
4.2	气隙磁通密度分析	41
4.2.1	磁通密度幅值和励磁电流的关系	41
4.2.2	定子励磁电流在不同时间的气隙磁通密度波形	42
4.2.3	转矩和转子电流作用下的磁通密度分布	44
4.3	磁链平衡研究	45
4.3.1	转子和定子转矩电流激活相确定	45
4.3.2	合成磁链计算	46
4.4	稳态电磁转矩计算	47
4.5	脉动电磁转矩分析	48
4.6	转子感应电压	49
4.7	定子相电路建模	51
4.7.1	转子电流对定子磁链的影响	52
4.7.2	单相等效电路的进一步研究	53
4.8	参数的确定	55
4.8.1	自感系数的计算	55
4.8.2	开槽气隙电压常数	60
4.9	定子相感应电压的研究	61
4.10	结束语	61
第5章	六相感应电机驱动系统的 MATLAB 仿真	63
5.1	六相感应电机驱动系统仿真模型创建	63
5.1.1	PI 速度调节器	65
5.1.2	同步位置及其速度计算模块	68
5.1.3	六相电流波形发生器	68

5.1.4	滞环控制器和逆变器	68
5.1.5	六相感应电机建模	70
5.1.6	机械运动系统	74
5.2	仿真结果	74
5.2.1	六相电流的波形	74
5.2.2	静态转矩测试	75
5.2.3	启动和稳态运行性能测试	75
5.2.4	阶跃转矩电流下的转矩响应	78
5.3	结论	79
第 6 章	六相感应电动机驱动系统实验研究	80
6.1	实验系统配置	80
6.1.1	电机实验台	81
6.1.2	功率逆变器	81
6.1.3	DSP 控制器	81
6.2	气隙磁通密度和励磁电流	82
6.3	PI 调节器和滞环电流控制器的研究	84
6.4	转矩电流极性确定	86
6.5	稳态转矩测试	88
6.6	k 值的确认	88
6.7	电机运行时转矩和转矩电流的关系	90
6.8	转矩响应	91
6.9	动态性能试验	92
6.9.1	起动—制动性能测试	92
6.9.2	负载扰动实验	92
6.10	感应电压估算	93
6.11	转子绕组感应电流波形测量	95
6.12	结论	96
第 7 章	结论和建议	97
7.1	六相感应电动机电磁转矩和磁链定向控制	97
7.2	六相感应电动机新颖电流控制理论	98
7.3	有限元分析	99

7.4	六相感应电机驱动系统的 MATLAB 仿真	100
7.5	六相感应电机驱动器的实验评价	100
7.6	建议	100
附录 A	六相感应电动机的设计说明	102
A.1	定子绕组的设计	102
A.2	转子绕组的设计	104
附录 B	定子转矩电流和转子电流的计算	106
附录 C	六相感应电动机的尺寸及励磁电流计算	107
C.1	六相感应电动机的尺寸	107
C.2	励磁电流的计算	107
附录 D	实验系统配置	112
D.1	六相感应电机测试装置	112
D.2	功率逆变器	113
D.3	DSP 控制器	113
D.3.1	DSP 芯片	115
D.3.2	EPLD 芯片	115
D.4	控制算法	115
D.5	滞环电流数字控制器	117
参考文献		118

第 1 章

绪 论

在众多类型的电机中,感应电机一直受到人们的青睐。工业上使用的驱动器至少 90% 是采用感应电机来驱动的^[1]。为什么感应电机在工业中应用如此受欢迎呢?主要是感应电机结构简单、坚固、制造成本低、维护容易、寿命长。这些原因使得感应电机相对于直流电机和其他交流电机来说,在工业设备中更受到人们的欢迎。

1.1 对调速驱动系统的评价

调速驱动系统的基本功能是通过电机把电能转换为机械能。电机的输出性能主要体现在转矩和转速上。在实际调速系统中,转矩和转速中的任何一个都可被控制,即转矩控制和转速控制。当调速系统是转矩控制模式时,转速的大小由负载决定。同样,当调速系统是转速控制模式时,转矩的大小由负载决定^[2,3]。

1.1.1 传统电机驱动系统

最初,直流电机被广泛用于调速系统中^[4],主要是因为其励磁磁通和转矩能够独立控制,且其电磁转矩和电枢电流呈线性关系。因此,很容易得到理想的速度和位置输出性能。但是,直流电机也由于其换向器和电刷的存在,使应用范围受到限制^[5,6]。首先,换向器和电刷需要定期维护;其次,换向器产生的火花使得直流电机不能用于易燃、易爆环境;最后,直流电机的换向器和电刷的机械接触限制了直流电机不能高速运转。但是,对于结构相对简单的感应电机来讲,它可以克服这些缺点。与同功率的直流电机相比,感应电机的体积较小且具有较大的转矩输出,由于其重量轻、转动惯量小,因此,目前很多学者都将注意力集中在模拟直流调速来实现交流调速上。交流调速经历了标量控制和矢量控制两个大的发展阶段。

标量控制^[7]主要用于成本、性能要求较低的调速系统中,这种控制方法不能



保证良好的动态性能,因为在这种控制算法里面没有考虑电机的暂态过程。尽管采取了一些提高标量控制性能的措施,结果仍然不能令人满意。因此,为了取得和直流调速一样的性能,Hasse 和 Blaschke 提出了矢量控制理论^[8]。矢量控制是感应电机通过变换定子电流到一个特殊的坐标系,实现磁链和转矩的解耦,来模仿直流电机的控制。

矢量控制最大的优点,就是可得到较好的动态性能,而矢量控制的主要缺点则是需要复杂的坐标变换。

在过去的 20 年里,大功率电子器件和大功率、低成本微处理器的发展以及现代交流电机控制技术的发展,都大大推动了交流调速的飞速发展。现代交流电机控制技术还包括直接转矩控制^[9,10]、模糊逻辑控制^[11]和神经网络控制^[12,13]。

1.1.2 多相感应电机调速系统

目前,感应电机调速发展的另一个方向是:定子相数超过三相的多相电机驱动系统。电力电子器件额定电压和额定电流的限制使得多相感应电机应运而生,因为这样可实现低压功率器件驱动大功率电机。多相感应电机目前主要应用于军事、航天、舰船推进等大功率传动上。与三相电机传动系统相比,多相感应电机系统具有以下突出的优势^[5]:

(1) 传动系统整体可靠性高。采用多相冗余结构的传动系统,当多相感应电机的一个(或几个)定子绕组开路或逆变器的一个(或几个)桥臂开路故障时,不会影响传动系统的启动和运行。

(2) 调速具有更多的控制资源和潜能。采用多相逆变器供电,可大大改进调速系统的性价比。

(3) 可用低压功率器件实现大功率传动,避免了由功率器件串联带来的静、动态不均压问题。

(4) 转矩脉动频率增加而脉动幅值减少,使系统动、静态特性得以改善。

(5) 转子谐波电流减小,谐波损耗下降。

Ward 和 Harer^[14]研究了五相电压源供电的感应电机驱动系统的性能。在这个系统中,主要的转矩纹波频率是十次谐波,它的振幅是三相电机驱动系统产生的六次谐波转矩的 1/3。但是,由于其三次及更高次谐波的相电流比较大,所以使得电机损耗较大。为此,很多学者着力于研究六相(双三相)电机。研究的结果表明,六相(双三相)电机在合理布置双三相绕组条件下,电机的输出转矩性能要比传统三相电机好;但是,在多相电机驱动中,五次和七次谐波会更严重一些。这些谐波在电机中产生的额外损耗,导致电机及其逆变器的尺寸和成本增

加。为了减少这些谐波并使得电流谐波最小,在电机设计和控制方面提出了各种不同的做法^[17-26]。

Toliyat 等人^[29,30]开展了五相交流电机直接力矩控制的研究,研究表明,此系统可以得到快速的转矩响应和较低的脉动转矩。

徐隆亚^[31]等人和 Lyra^[32]等人通过注入三次谐波电流,并利用磁场定向控制分别对五相和六相感应电机转矩密度的提高进行研究。最终得到的结论是:通过注入三次谐波电流,电机输出的电磁转矩性能可以得到明显改善。

研究表明,多相感应电机驱动系统比传统的三相电机驱动系统具有较多优势。这些优点包括:转矩脉动振幅降低和频率增大;转子谐波电流减小;在保持相电压不变的情况下,降低了相电流,增强了电机运行的可靠性。



1.2 存在的问题

由相关文献可知,多相感应电机驱动的矢量控制实现起来相当复杂,这主要是因为矢量控制需要复杂的坐标变换和准确的磁链估计。为了解决这个问题,作者提出了一种关于六相感应电动机驱动的新颖电流控制方案。在这个控制方案中,通过在六相感应电动机定子侧注入梯形波相电流,从而实现励磁磁场和转矩磁场的直接控制,而不需要复杂的派克变换。这些梯形波相电流波形在电机气隙中产生旋转的近似于方波的磁通,从而在转子中感应出近似于方波的相电流,就像直流电动机的电枢绕组电流那样。

到目前为止,该六相感应电机驱动的新颖控制原理,并没有被提出和进行研究,还没有任何关于梯形波相电流的文献信息。这就有必要对六相感应电机驱动系统进行深入的研究。

本书将就上面所提及的六相感应电机进行以下几方面的研究:

- (1) 详细阐述并且分析六相感应电机的工作原理。
- (2) 利用有限元分析软件对六相感应电机每相电路建模并进行仿真。
- (3) 通过 MATLAB 仿真和实验测量来研究、验证六相感应电机的转矩和动态性能。



1.3 解决的方法

在本书中,通过深入开展理论和有限元(FE)分析,对六相感应电机驱动



器的原理进行了深入研究。在理论分析中,分析了电机气隙磁通密度,推导出六相感应电机的电磁转矩公式并计算出电磁转矩;通过近似磁路(AMC)法确定电机的励磁电流与气隙磁通密度的关系,这种方法需考虑磁饱和。为了分析电机中的时间和空间谐波,对气隙磁动势(MMF)中的谐波进行了分析研究。

本书采用由剑桥大学开发的有限元程序,应用这种有限元分析软件对六相感应电动机的性能进行研究。

运用 MATLAB/SIMULINK 软件对整个驱动系统的性能进行了仿真研究。通过实验来验证六相感应电机的转矩动态响应的精确度和准确性。作为首次研究关于梯形波相电流驱动下六相感应电机的著作,该著作没有过多关注驱动系统其他方面的性能,如功率因数、效率和铁损耗等。

第 2 章

多相感应电机理论与控制

在这一章中, 主要介绍直流电机、感应电机的转矩产生机理。在矢量控制方面, 通过选择不同的参考坐标系, 可以得到电机的三种转矩方程。这表明, 当选定一个特定的参考坐标系时, 相应的转子磁场、气隙磁场或定子磁场的空间向量也就被确定。在电磁转矩的表达式中, 包含励磁电流分量和转矩电流分量。下面就传统感应电机的矢量控制进行分析和讨论。

2.1 电磁转矩的产生机理

这里主要讨论直流电机和感应电机的电磁转矩产生机理。为简化分析计算, 忽略磁路的非线性。为了对直流电机和感应电机的电磁转矩产生机理进行对比, 将给出这两种电机的电磁转矩的空间向量表达式。

2.1.1 直流电机的电磁转矩产生机理

图 2.1 (a) 给出了一个具有补偿绕组的直流电机示意图。在直流电机的定子绕组中有一个励磁绕组 (f) 和一个补偿绕组 (c), 在转子绕组中有一个电枢

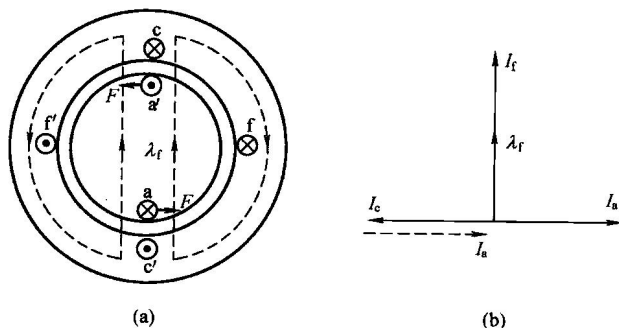


图 2.1 直流电机的电磁转矩产生机理

(a) 具有补偿绕组的直流电机示意图; (b) 向量图

绕组 (a), 励磁电流 I_f 产生励磁磁链 λ_f 。如果电枢绕组中通以电流 I_a , 电枢电流和励磁磁链相互作用将在转子导体中产生电磁力, 如图 2.1 (a) 所示。由于励磁磁链在空间与电枢电流向量正交 [见图 2.1 (b)], 其产生的最大电磁力对电磁转矩是最优的。

由图 2.1 可知, 电枢绕组也产生磁场, 其在空间上与励磁磁链正交, 与励磁绕组产生的磁场叠加, 因此合成磁场将偏离其最优位置。因此, 当补偿绕组电流 I_c 等于 I_a 时, 这种影响将被抵消。

在图 2.1 (b) 中, 励磁绕组、补偿绕组和电枢绕组的电流空间向量的幅值分别为 I_f 、 I_c 、 I_a , 励磁磁链为 λ_f 。

励磁磁链和电枢绕组中的电流的相互作用产生电磁转矩。在假定磁场线性条件下, 电磁转矩的瞬时值可以用励磁磁链和电枢电流矢量运算来表示, 即

$$T_e = c \vec{\lambda}_f \times \vec{i}_a \quad (2.1)$$

式中, c 是一个常数: “ $\times$ ” 表示矢量的运算。

因两个向量在空间上是正交的, 故式 (2.1) 又可写成

$$T_e = c \lambda_f I_a \quad (2.2)$$

如果励磁磁通保持不变, 可通过改变电枢电流来控制电磁转矩。感应电机矢量控制的目的, 即找到一个模拟直流电机的快速转矩控制技术。

2.1.2 感应电机的电磁转矩产生机理

对于感应电机, 其转矩控制策略要比直流电机困难得多, 因为感应电机的励磁电流和所感应的转子电流是相互耦合的。通过矢量坐标变换, 可获得两个电流分量, 其中一个是励磁电流分量, 另一个是转矩电流分量。

感应电机的电磁转矩可表示为

$$T_e = -\frac{3}{2} \vec{\lambda}'_r \times \vec{i}'_r \quad (2.3)$$

式 (2.3) 是转子磁场定向控制的基础。

对于极对数为 p 的电机来说, 式 (2.3) 需再乘以极对数 p 。对于感应电机, 通过坐标变换将定子磁链、转子磁链、气隙磁链变换到对应的 dq 坐标系上 (见图 2.2), 可获得电机电磁转矩的相应表达形式。

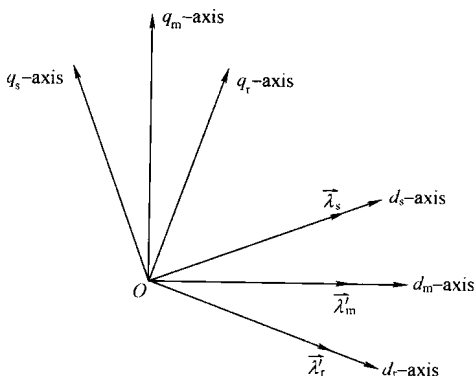


图 2.2 定子(s)、转子(r)、气隙(m)磁链参考坐标图



2.1.3 电磁转矩方程表达形式

如前所述,选定不同的参考坐标系对电磁转矩输出的大小是没有影响的。但是,从控制理论的观点来看,选择不同的参考坐标系,会影响转矩方程表达形式,本节将介绍不同的坐标系下转矩方程的表达形式。

(1) 转子磁场定向

将 d 轴与转子磁链重合,称为转子磁场定向控制。在转子磁场定向控制中,

$$\vec{\lambda}'_{dr} = \vec{\lambda}'_r, \vec{\lambda}'_{qr} = 0, i'_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs}^{[2, 5, 34]}。$$

由式 (2.3) 可推导出转矩方程为

$$\begin{aligned} T_e &= -\frac{3}{2} \vec{\lambda}'_r \times \vec{i}'_r \\ &= -\frac{3}{2} \vec{\lambda}'_{dr} \times (i'_{dr} + j i'_{qr}) \\ &= -\frac{3}{2} \vec{\lambda}'_{dr} \times \left[i'_{dr} + j \left(-\frac{L_m}{L_r} i_{qs} \right) \right] \\ &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda'_{dr} i_{qs} \end{aligned} \quad (2.4)$$

转子磁场定向控制实现励磁电流分量和转矩电流分量完全解耦。这种控制方法已广泛应用于感应电动机驱动上,但转子磁场检测受转子参数的影响较大,一定程度上影响了系统性能。

(2) 定子磁场定向

若同步参照系的 d 轴与定子磁链重合,称为定子磁场定向控制。在定子磁场定向控制中, $\vec{\lambda}_{ds} = \vec{\lambda}_s, \vec{\lambda}_{qs} = 0, i'_{qr} = -\frac{L_s}{L_m} i_{qs}^{[7, 35, 36]}。$

由式 (2.3) 可推导出转矩方程为

$$\begin{aligned} T_e &= -\frac{3}{2} \vec{\lambda}'_r \times \vec{i}'_r = -\frac{3}{2} (L_r \vec{i}'_r + L_m \vec{i}'_s) \times \vec{i}'_r \\ &= -\frac{3}{2} L_m \vec{i}'_s \times \vec{i}'_r = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} (L_s \vec{i}'_s + L_m \vec{i}'_r) \times \vec{i}'_r \\ &= -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} \vec{\lambda}_s \times \vec{i}'_r = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} \vec{\lambda}_{ds} \times (i'_{dr} + j i'_{qr}) \\ &= -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} \vec{\lambda}_{ds} \times \left[i'_{dr} + j \left(-\frac{L_s}{L_m} i_{qs} \right) \right] \\ &= \frac{3}{2} \lambda_{ds} i_{qs} \end{aligned} \quad (2.5)$$



定子磁场定向控制的优点是可以得到较为准确的定子磁链, 适合恒功率调速。

(3) 气隙磁场定向

若同步参照系的 d 轴与气隙磁链重合, 称为气隙磁场定向控制。在气隙磁场矢量控制中 $\lambda_{dm} = \lambda'_m, \lambda_{qm} = 0, i'_{qr} = -i_{qs}$ [34, 37, 38]。

由式 (2.3) 可推导出转矩方程为

$$\begin{aligned}
 T_e &= -\frac{3}{2} \lambda'_r \times \vec{i}'_r = -\frac{3}{2} (L_r \vec{i}'_r + L_m \vec{i}'_s) \times \vec{i}'_r \\
 &= -\frac{3}{2} L_m \vec{i}'_s \times \vec{i}'_r = -\frac{3}{2} L_m (\vec{i}'_m - \vec{i}'_r) \times \vec{i}'_r \\
 &= -\frac{3}{2} L_m \vec{i}'_m \times \vec{i}'_r = -\frac{3}{2} \lambda'_m \times \vec{i}'_r \\
 &= -\frac{3}{2} \lambda'_{dm} \times [i'_{dr} + j(-i_{qs})] \\
 &= \frac{3}{2} \lambda'_{dm} i_{qs}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

利用这种控制方法可以直接测量气隙磁链, 因而基于气隙磁通定向控制适合于磁饱和的情况。

2.1.4 总结

本节介绍了直流电机和感应电机的转矩产生机理以及转矩表达式的各种形式。从中可以发现在特定参照系下, 固定转子磁链、定子磁链和气隙磁链空间向量的转矩表达式与他励直流电机的转矩表达式是类似的。这表明感应电机的转矩控制, 可以通过对定子电流解耦分解成励磁电流分量和转矩电流分量, 这与直流电机相互独立的励磁电流和电枢电流是相似的。通过派克变换 [7, 36], 感应电动机定子电流可分解为励磁电流分量和转矩电流分量。此外研究表明, 磁场定向控制(矢量控制), 需要分别知道转子磁场、定子磁场、气隙磁场空间向量的模、空间位置。但是, 由于磁场参数的非线性 [5, 34, 36], 磁场定向数学模型的计算很复杂。

转子磁场定向控制由于励磁磁通和转矩电流的完全解耦, 所以通常应用于感应电机控制中, 和定子磁场定向控制和气隙磁场定向控制比较, 转子磁场定向控制是比较简单的。然而, 定子磁场定向控制和气隙磁场定向控制也有其优点, 即定子磁链和气隙磁通量可直接测量出。特别是在图 2.3 所示的气隙磁场定向控制向量图中, 电机中气隙磁通密度可以被检测。因此, 基于气隙磁场定向的控制器适合处理磁饱和的情况。