

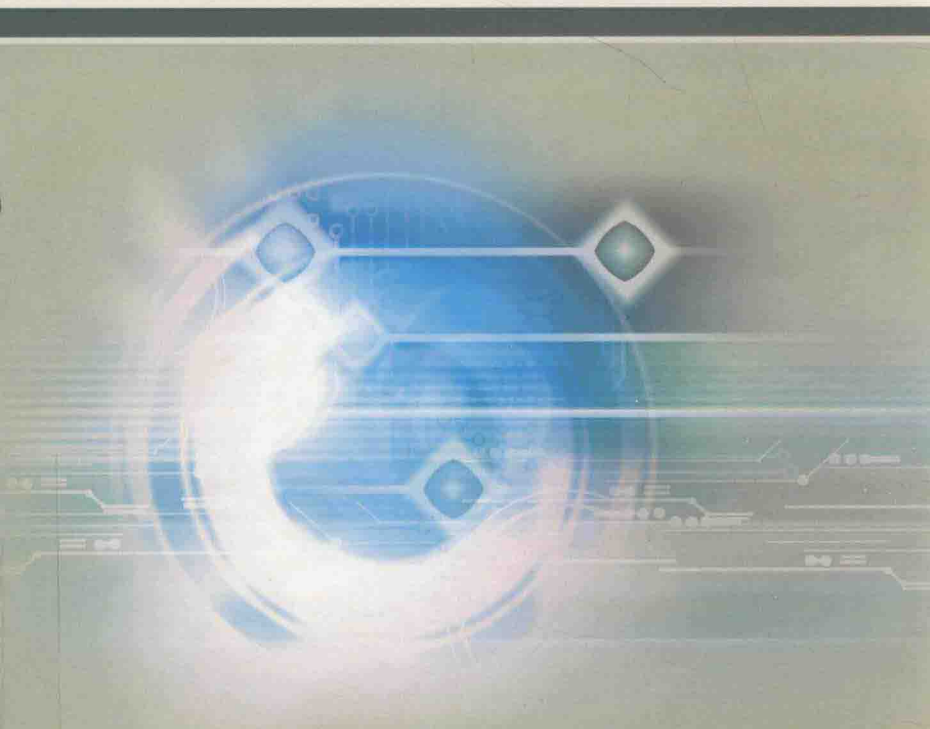
DIANLICI TONGBU DIANJI

Wu Chuanganqi Kongzhi Jishu Yanjiu

电励磁同步电机

无传感器控制技术研究

王 磊 冯文轶 著



中国矿业大学出版社

电励磁同步电机 无传感器控制技术研究

王 磊 冯文轶 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书主要研究了大功率电励磁同步电机传动控制的关键技术。介绍了电励磁同步电机控制系统的研究现状;给出了励磁绕组参数在两种坐标系下的折算关系,并建立了同步电机的状态方程;介绍了一种基于自传感理论的温度检测方法和电机绕组参数在线辨识技术;介绍了基于定子侧高频注入的转子位置观测方法和基于转子侧高频信号的转子位置观测方法;对同步电机样机在不注入高频信号、定子注入高频信号和转子注入高频信号等不同激励条件下进行了有限元分析。

图书在版编目(CIP)数据

电励磁同步电机无传感器控制技术研究 / 王磊,
冯文轶著. — 徐州: 中国矿业大学出版社, 2014. 8
ISBN 978 - 7 - 5646 - 2465 - 1

I. ①电… II. ①王… ②冯… III. ①励磁系统—同
步电机—无线电通信—传感器—研究 IV. ①TM341

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第202788号

书 名 电励磁同步电机无传感器控制技术研究
著 者 王 磊 冯文轶
责任编辑 张 岩 郭 玉
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 850×1168 1/32 印张 6.25 字数 161 千字
版次印次 2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷
定 价 26.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

基于电力电子技术的同步电机驱动系统具有效率高、调速范围宽、调速精度高、稳定性强、动态响应快等优点,在高压大功率、高性能场合得到了广泛的应用。由于现有系统需要安装大量传感器,系统硬件复杂,故障率高,影响了系统可靠性。另外,电机参数变化也会影响系统的性能。无传感器控制技术和参数在线辨识技术的应用是提高驱动系统可靠性和效率的有效途径。本书以电励磁同步电机控制系统为研究对象,对同步电机的无传感器控制、参数在线辨识等关键技术进行了深入研究。

本书主要对大功率电励磁同步电机传动控制的关键技术进行了研究,在第1章对电励磁同步电机控制系统的研究现状进行了介绍,简要地介绍了大功率同步电机调速系统的国内外研究现状,阐明了同步电机调速系统的类型和特点以及控制策略,归纳总结了同步电机无传感器控制技术的研究现状,主要包括基于反电动势的方法、基于电感的方法、模型参考自适应法、高频注入法、基于状态观测器的方法以及人工智能等高级智能算法。

第2章首先详细介绍了同步电机在自然坐标系下和旋转 $d-q$ 坐标系下的数学模型,给出了励磁绕组参数在两种坐标系下的折算关系,并建立了同步电机的状态方程。再给出了按转子磁链定向、定子磁链定向以及气隙磁链定向三种控制方式下的同步电机数学模型。然后对三种磁链定向控制方式进行了比较分析,可知,无论采用上述哪种磁链定向控制方式,电动机的电磁转矩都与定子电流转矩分量和定向磁链成正比关系。在稳态时,都可以较好

地实现转矩的解耦控制;而动态时,只有按转子磁链定向控制在满足一定条件时可以实现动态解耦。而转子磁链定向控制一般只适用于小容量同步电机的控制,按定子磁链定向和气隙磁链定向控制则适用于大容量同步电机的控制。最后介绍了同步电机按气隙磁链定向矢量控制系统,并给出了相应的仿真图形,结果表明矢量控制系统具有良好的控制性能,但受定子电阻影响明显。

第3章主要介绍了一种基于自传感理论的温度检测方法和电机绕组参数在线辨识技术,包括转子和定子温度、转子和定子电阻的无传感器在线辨识技术。本方法只需要通过基本的电压电流传感器所得的转子电压电流信号,就可以对绕组温度和电阻进行准确的在线辨识,不需要其他额外的传感器。本方法是利用绕组材料的温度特性,来对绕组的温度和电阻进行估算。基于自传感的检测方法对定子外冷式电励磁同步电机的转子和定子温度、电阻的辨识精度都较高,但是对于转子强迫风冷式电机的定子温度辨识误差较大,对转子温度辨识精度也较低。所以这种自传感温度检测方法和定子电阻辨识方法有着十分重要的实用价值。

第4章介绍了电励磁同步电机基于定子侧高频信号注入的转子位置观测方法和基于转子侧高频信号注入的转子位置观测方法。在基于定子侧高频信号注入方法中,推导出了电励磁同步电机的转子位置检测公式;在基于转子侧高频信号注入方法的基础上,给出了一种转子高频信号注入的实现方法,即利用转子三相可控整流桥所固有的高频信号作为高频注入信号。并对上述各方法进行了理论研究和仿真分析,仿真结果表明,基于定子侧高频信号注入方法可以很好地对电机转速和转子位置进行在线辨识,可以作为速度和位置反馈信号实现电机的无速度传感器矢量控制;而在基于转子高频信号注入的方法中,可以获得一定的稳态转速和位置观测效果,但在转速和负载突变时,定子电流的剧烈变化影响了定子侧有效高频感应信号的提取,进而使得转速和转子位置检

测出现一定的扰动和较大误差,但能够对转子初始位置进行准确的估计。

因此,对于定子注入高频信号和转子注入高频信号的无传感器技术而言,定子注入高频信号的方法更容易实现无传感器矢量控制,而转子注入高频信号的方法可以用于转子的初始位置估计,还可以在电机平稳运行时提供较为准确的速度保护信号,使系统更加安全可靠。

第5章对同步电机样机在不注入高频信号、定子注入高频信号和转子注入高频信号等不同激励条件下进行了有限元分析。通过有限元计算验证了定子注入高频信号和转子注入高频信号时,转子角度、速度与高频信号输出关系的正确性。通过分析发现由高频信号磁场产生的磁阻转矩和异步转矩不大,对同步电机的总转矩影响较小,但是注入高频信号时电机的铁损耗会增大些。

通过有限元分析可知,高频信号的选取应注意以下两点:

(1) 幅值太高的高频信号在电机中会产生较大的高频铁损耗和高频脉振转矩,使电机效率降低,铁芯发热增加,需要注入合理幅值的高频信号。但是注入的高频信号幅值太小,输出信号很弱,高频信号的检测很困难,甚至无法正确提出有用信号。

(2) 高频信号的频率选择要适中。为了高频信号的准确提出,注入的高频信号频率需要远大于电源基波频率,同时还要避开齿谐波频率。但是注入的高频信号频率也不能太高,原因是:① 功率变换器的开关频率的限制;② 电机绕组中存在寄生电容,频率越高其容抗越小,泄漏电流越大,高频主磁通将减少,副边的输出电压减小,高频信号检测的灵敏度下降;③ 频率变高铁损耗增加,原边绕组高频漏阻抗压降增大,主磁通大大减少,副边的输出电压减小,高频信号检测的灵敏度下降。

目 录

1	电励磁同步电机控制系统研究现状	1
1.1	大功率同步电机调速系统的国内外研究现状	2
1.2	同步电机无传感器控制技术的研究现状	10
2	同步电机的数学模型及矢量控制技术	14
2.1	引言	14
2.2	同步电机三相静止坐标系中的数学模型	15
2.3	同步电机旋转 $d-q$ 轴坐标系下的数学模型	22
2.4	旋转 $d-q$ 坐标系下转子参数的折算以及动态等效电路	27
2.5	同步电机的状态方程	31
2.6	同步电机磁链定向控制方法	32
2.7	按气隙磁链定向的同步电机矢量控制系统	41
2.8	本章小结	49
3	同步电机自传感参数辨识技术研究	50
3.1	引言	50
3.2	同步电机的损耗和温度场分析	52
3.3	基于自传感的同步电机温度与电阻辨识技术研究	63
3.4	基于自传感的同步电机参数辨识的实验分析	66
3.5	本章小结	80

4 同步电机的无传感器矢量控制技术研究	81
4.1 引言	81
4.2 无传感器控制技术研究概况	82
4.3 基于定子高频信号的同步电机无传感器控制技术	84
4.4 基于转子高频信号的同步电机无传感器控制技术	99
4.5 本章小结	112
5 注入高频信号的同步电机的有限元分析	114
5.1 引言	114
5.2 无高频信号的同步电机的有限元分析	115
5.3 定子注入高频信号的同步电机有限元分析	123
5.4 转子注入高频信号的同步电机有限元分析	146
5.5 定子注入高频无传感器检测技术的实验分析	167
5.6 转子注入高频无传感器检测技术的实验分析	177
5.7 本章小结	182
参考文献	184

1 电励磁同步电机控制系统研究现状

随着工业化进度的加快,大功率电力驱动系统在生产中的地位越来越重要。在以前,直流电力驱动系统具有调速范围宽、动态静态性能好、效率高、结构简单等优点,广泛应用于各种高性能调速场合;而交流拖动系统(如异步电机拖动系统和同步电机拖动系统)由于其存在数学模型复杂、实现控制困难等缺陷,一直不能得到更广泛的应用。近年来,随着电力电子器件的发展以及交流电机拖动系统基础理论的发展,交流电机拖动系统有取代直流驱动系统的趋势。

直流电动机的好调速性能得益于其电机结构。电机的机械换向装置使得转矩电流和励磁电流解耦,可以对它们进行单独控制,因此具备良好的调速性能。然而,直流电动机的这种机械换向结构也成了制约其发展和应用的根本原因,机械换向装置的存在使得直流电动机制造复杂,成本非常高且维护量大。另外,电机运行时,电刷下面容易产生火花,一方面会影响电机本身的性能和寿命;另一方面限制了它的使用范围,即直流电力驱动系统不能应用于易燃、易爆、粉尘等特殊场合,在高速、大容量场合的应用也非常困难。

交流电机相对于直流电机而言具有结构简单、坚固耐用、成本低廉、故障率低、运行和维护方便等优点,对于同步电机还有功率因数可以调节的优点,因而它们广泛应用于早期大部分不调速或调速能力要求不高的场合。而随着近代电力电子技术的发展,以及交流调速理论的不成熟,交流拖动系统已经成为整个电气传

动系统的主流,广泛应用于各种应用场合,特别是在大功率传动领域已经发挥着越来越重要的作用。

关于交流传动系统的研究,近些年来已经转向无位置传感器控制系统的研究领域,即利用检测定子电压、电流等容易测量的物理量进行位置估算以取代位置传感器。无传感器控制技术不需要安装相关机械传感器等硬件设备,降低了系统成本,提高了系统可靠性,将成为今后交流传动系统发展的必然趋势。

1.1 大功率同步电机调速系统的国内外研究现状

电力变换技术作为控制电功率流动和改变电能形态的有力手段,能够按照要求输出合适的电压电流,达到改变或保持电机运行状态的目的。而电力电子技术、微处理器技术的发展带来了电力变换技术的迅猛发展。电力变换技术广泛地应用于电机调速系统中,控制电动机运行状态,以满足生产需求。

相应的交流调速技术也取得了快速的发展。矢量控制理论的提出,实现了交流电机定子电流励磁分量和转矩分量的解耦,解决了交流电机的转矩控制问题,从而使交流调速系统的控制性能可以与直流调速系统相媲美。而直接转矩控制方法,即直接在定子坐标系进行磁链和转矩的计算,通过磁链跟踪型 PWM 逆变器的开关状态来直接控制电机的转矩,不用对定子电流进行解耦就可以实现电机的转矩控制,这样就使计算变得简单,便于实现数字化。而随着现代控制理论的发展,相应的控制策略也不断涌出,如二次型性能指标的最优控制和双位模拟调节器控制、滑模变结构控制、模糊控制、人工神经网络控制、自适应控制等,使得交流调速系统的前景更为广阔。

1.1.1 同步电机调速系统的类型及特点

同步电机变频调速系统从控制方式上可以分为两大类,即他控式变频调速系统和自控式变频调速系统。

他控式变频调速系统是指给同步电机供电的逆变器输出频率是由转速给定信号决定的,一般属于开环控制系统,适合于多台机组并联运行的场合。但由于存在着转子振荡、失步等问题,在实际的调速场合中很少使用。

自控式变频调速系统则是通过位置传感器检测同步电机转子位置,逆变器的输出频率由电动机自身转子的位置及转速决定。这样就可以使电动机工作在同步状态,从而解决同步电机调速过程中的失步问题。

一般来说,变频器的选取对同步电机控制系统的组成、性能和应用场合都有影响,因此自控式同步电机调速系统按所用变频器的不同,可分为以下三种最常见的基本类型。

(1) 交—直—交电压型同步电机调速系统

图 1-1 为交—直—交电压型同步电机调速系统的结构图。图中 SM 为同步电机, T 为速度和位置传感器。定子主回路由三相不可控整流桥、滤波电容以及 IGBT 逆变器组成,转子则由三相可控整流桥供电。其中,定子主电路中工频交流电压经整流桥后变为恒定的直流电压,经滤波后加在 IGBT 逆变器上,然后采用脉宽调制技术使逆变器输出幅值,频率可调,波形接近方波的电压,加在同步电机的定子绕组上进行调速控制。这种调速系统主要有以下优点:

① 逆变桥采用自关断器件,结构更为简单,控制灵活;

② 调速范围宽,可做到 3 000 : 1,或更高;

③ 采用现代电机控制理论(如矢量控制、直接转矩控制等)和微机技术,可以构成高性能大、功率的全数字同步电机调速系统。

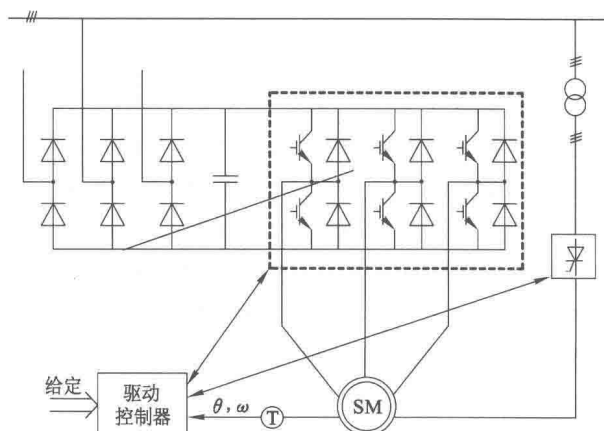


图 1-1 交—直—交电压型同步电机调速系统

(2) 交—直—交电流型同步电动机调速系统

图 1-2 是交—直—交电流型同步电机调速系统的结构图。整流桥、逆变桥以及平波电抗器构成了定子主回路，晶闸管是电路中的主要电力电子器件；转子同样由三相可控整流桥供电。其中通过控制电源的交流电压来关断整流桥的晶闸管，通过负载同步电机定子的交流反电动势来关断逆变桥中的晶闸管，因此本系统也称为负载换相的同步电机调速系统。与电压型同步电机调速系统类似，工频正弦电压经整流桥后转换为可控的直流电，然后再由逆变器转换为频率可控的交流电，供给同步电机的电枢绕组，实现变频调速。这种调速系统具有以下特点：

① 逆变器通过负载反电动势换相，晶闸管的数量较少，结构简单，便于控制，不仅可用于大容量、高电压和高转速调速的场合，而且能适用于恶劣环境；

② 能实现无级调速，调速范围为 10 : 1，可以四象限运行；

③ 因低速采用断续换流，低速运行性能不好，但能实现恒流

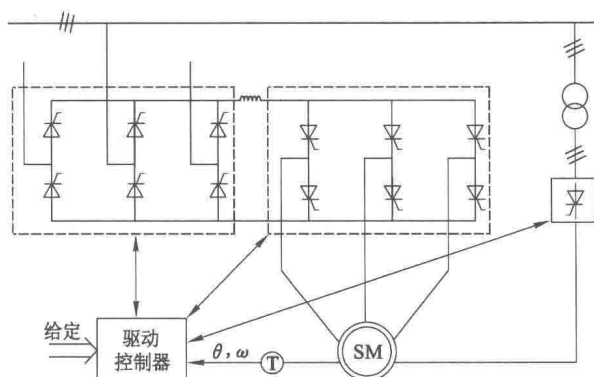


图 1-2 交—直—交电流型同步电机调速系统

启动,启动方便,平稳运行;

④ 电动机定子三相电流不是平滑的正弦波,是 120° 的方波,这不仅使得电动机存在转矩脉动,而且还增加了电动机的损耗;

⑤ 电动机要工作在超前功率因数区才能达到逆变器的换向要求,这时要求变频器具有更大的容量,而且减弱了系统的过载能力。

(3) 交—交变频同步电机调速系统

图 1-3 给出了交—交变频同步电机调速系统的结构图。定子主电路由三组无环流反相并联连接的晶闸管桥式变流器组成;转子仍然采用可控三相整流桥供电。其中定子的三套桥式变流器连接成星形结构,通过控制加到同步电机定子绕组的三相正弦电压的频率和幅值,可以实现变频调速。这种调速系统具有以下特点:

① 交—交变频器原理简单,运行可靠,维护方便;

② 变频器由 36 只晶闸管组成,结构复杂,通常主要用于大功率同步电机;

③ 采用电源电压换相,可以实现单位功率因数运行,过载能

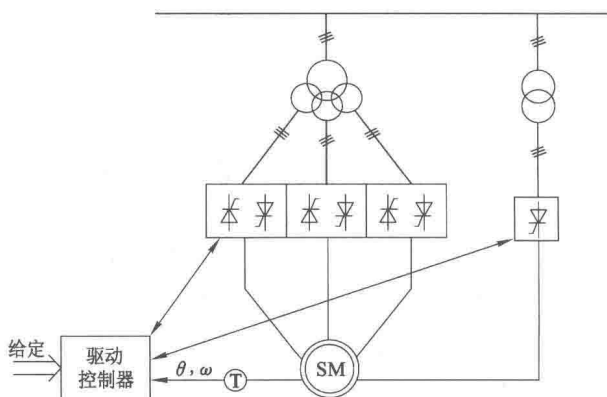


图 1-3 交—交变频同步电机调速系统

力强；

④ 当供电频率为 50 Hz 时，交—交变频器最大输出频率小于 20 Hz，因而同步电机运行受限制；

⑤ 流过电机电枢的三相电流接近正弦波，谐波损耗小，转矩脉动低，电动机低速运行效果好；

⑥ 采用矢量控制技术或直接转矩控制，可实现高性能、大功率同步电机调速系统。

1.1.2 同步电机调速系统控制策略的研究现状

随着人们对交流电动机控制规律的认识不断深化和提高，交流电动机控制策略作为现代交流调速系统的关键，也得到了很大的发展。目前变频调速主要有标量控制法和矢量控制法，其中标量控制法是基于电动机稳态模型来控制的，而矢量控制法是基于电动机动态模型来控制的。

(1) 标量控制法

由于最初人们对交流电动机的研究主要是其稳态模型，因而

早先的交流电动机控制系统均是基于交流电动机的稳态数学模型来构建的。基于稳态模型的标量控制法主要有转差频率控制和恒压频比控制两种方法,其中转差频率控制采用转速闭环结构,而恒压频比控制采用转速开环结构。由于它们主要是通过控制定子电流(电压)幅值和频率等标量来达到控制的目的,所以这种控制系统称为标量控制系统。

转差频率控制方法是在气隙磁通幅值保持恒定的条件下(基频以下调速),将转差频率控制在一定的范围内,以达到间接控制转矩的目的。然而对同步电机而言,其稳态运行时转差频率为零,故这种控制策略显然不适合同步电机调速。因此同步电机调速采用恒压频比控制策略,即他控式变频调速系统。

恒压频比控制方法是通过控制电机的电压、频率等外部变量来对系统进行控制的。这种控制方法在控制时不需要从电动机端部引入任何反馈信号,仅仅是通过输入到控制系统的参考电压和频率指令,由逆变器产生相应的交变的正弦电压,将这个电压输出到电动机的定子绕组上,电机就可以在指定的电压和频率下正常运行。因为这种方法属于开环控制,虽然具有易于实现且成本较低等优点,但也存在着许多缺陷,即没有引入任何反馈信号,导致无法准确及时地获得电机的实时动态信息,因而不能较为精确地对电磁转矩进行控制。而由于该控制策略是基于电动机的稳态模型,因此系统动态响应比较缓慢,突加负载时甚至可能出现振荡、失步等问题。故这种驱动系统仅适用于风机、水泵等无需精确控制且对动态性能要求不高的场合。

(2) 矢量控制法

交流电动机作为一个多变量、非线性、强耦合的受控对象,其电磁转矩不仅与定转子磁链的幅值有关,还与它们之间的夹角有关。而在标量控制系统中,控制规律是根据电机的稳态模型来设计的,因此对于任意两个磁链矢量,不能对它们的大小和相位

进行控制,动态性能较差。要想获得理想的动态性能,必须在动态过程中对磁链的幅值和相位同时进行控制,因而出现了基于电动机动态模型的矢量控制法。即以空间矢量理论为基础,分别用一个有大小和方向的空间矢量来表示交流电机的电压、电流和磁链,通过对这些空间矢量的大小和方向进行控制,就可以对交流电动机电磁转矩进行实时动态控制。目前,基于矢量控制法的交流电动机控制策略主要分为磁场定向矢量控制和直接转矩控制两种。

① 磁场定向矢量控制

20 世纪 70 年代初,磁场定向控制理论由德国学者 F. Blaschke 首先提出,从理论上解决了异步电动机转矩的高性能控制问题,之后经过各国学者和工程师的不断完善,形成了现有的交流电动机磁场定向矢量控制系统。1972 年,德国学者 Bayer 将该理论应用于同步电机,提出了同步电机磁场定向控制理论。同步电机磁场定向控制依据定向磁链的不同主要分为以下三种:气隙磁链定向、定子磁链定向和转子磁链定向。这里以最常用的气隙磁链定向为例,说明同步电机磁场定向控制的原理。同步电机磁场定向控制可简单描述为,在气隙磁场方向上重新建立一个正交坐标系(即 MT 坐标系),使该坐标系与转子坐标系保持相对静止,进而可以将定子电流矢量在此坐标系中分解为两个相互正交的分量:即定子电流励磁分量和定子电流转矩分量,前者主要产生磁通,而后者主要是产生转矩。通过控制定子电流励磁分量和转矩分量就可以分别对磁通和转矩进行控制,实现对同步电机的磁场和转矩的解耦控制。

在同步电机的磁场定向控制中,定子电流励磁分量和转子励磁电流共同作用产生同步电机的气隙磁链,如果使定子电流励磁分量为零,则气隙磁链全部由转子电流来产生,可以实现同步电机的单位功率因数运行。

磁场定向矢量控制系统依靠励磁分量和转矩分量的解耦控制

可以获得类似于直流电动机的工作特性,具有良好的转矩响应和精确的速度控制,零速时可实现全负载。然而对于常用的凸极同步电机,转子上的凸极结构导致直轴磁阻和交轴磁阻不同,进而使得磁势矢量与由其产生的磁链矢量的时空位置不同,因而对于采用磁场定向控制的矢量控制系统,实现真正意义上的完全解耦是不可能的。在实际应用中定向磁链的准确观测以及电机参数的变化都对磁场定向矢量控制系统的性能产生影响。这些问题都是磁场定向矢量控制系统的不足之处,有待进一步研究。

② 直接转矩控制

1985年,德国鲁尔大学的 M. Depenbrock 教授和日本学者 I. Takahashi 针对异步电动机提出了一种不同于磁场定向矢量控制的全新的交流电动机调速控制理论——直接转矩控制(DTC)。直接转矩控制在定子坐标系中直接对电动机的定子磁链和转矩进行控制。直接转矩控制的具体实现是首先建立一个离线的最优开关表,再根据转矩和磁链滞环控制器的输出信号以及定子磁链矢量的位置信号从表中选择合适电压空间矢量来控制逆变器中功率开关的状态,输出合适的电压作用于电机定子绕组。

磁场定向矢量控制和直接转矩控制都已广泛应用于高性能交流调速系统,两者均采用转矩和磁链分别控制,但它们的控制性能还是存在着不同。磁场定向矢量控制强调磁链与转矩的解耦,实行连续控制,调速范围较宽。而直接转矩控制则采用转矩和定子磁链的砰—砰控制,避免了进行旋转坐标变换的麻烦,只受到电机定子电阻的影响,而与电机其他参数无关。直接转矩控制简化了控制结构,但却产生了转矩脉动,低速性能差,调速范围受到限制。

因此,在实际应用中,应根据实际情况综合考虑各种因素后选择合适的控制方式,满足实际需要。