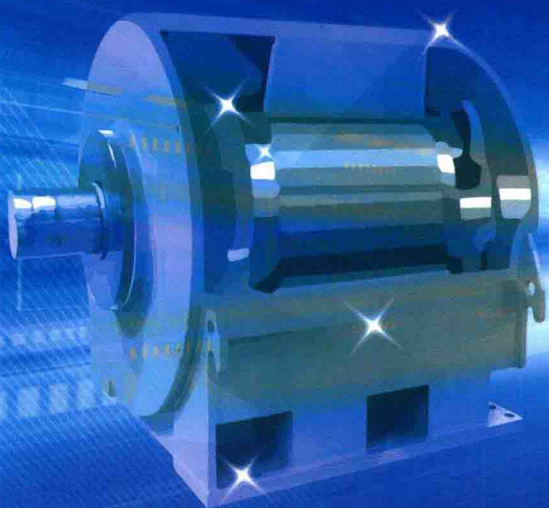


基于 变磁阻磁场调节机理的 永磁同步电动机

李春艳◎著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



基于变磁阻磁场调节机理的 永磁同步电动机

李春艳 著



机械工业出版社

本书在传统永磁同步电动机弱磁原理分析和永磁同步电动机国内外研究现状的基础上,提出了一种新型基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机,建立了基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机的数学模型,阐述了基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机的弱磁机理;研究计算了基于变磁阻调节机理的永磁同步电动机转子永磁体的受力;分析了基于变磁阻调节机理的永磁同步电动机气隙磁场调节特性;研究了基于变磁阻(磁场)调节机理的永磁同步电动机的电磁参数对弱磁调速范围的影响。相关成果为解决永磁同步电动机弱磁困难提供了一条新途径。本书的读者对象为从事电动机研究的科技人员以及在校的博士和硕士研究生。

图书在版编目(CIP)数据

基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机 / 李春艳著.

—北京:机械工业出版社,2016.11

ISBN 978-7-111-55305-2

I. ①基… II. ①李… III. ①永磁式电机—同步电动机 IV. ①TM351

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第264961号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码 100037)

策划编辑:朱 历 责任编辑:陈大立

责任校对:舒 莹 封面设计:付海明

责任印制:陈大立

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2016年11月第1版第1次印刷

169mm×239mm·7.5印张·280千字

标准书号:ISBN 978-7-111-55305-2

定价:30.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换。

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

永磁同步电动机具有高功率体积比、高效率和良好的控制特性等优点，近年来在多个领域获得了广泛的研究和应用。然而，永磁同步电动机采用永磁体励磁，电动机加工完成后励磁磁场难以调节，导致恒功率运行范围小，限制了其应用，因此必须进行弱磁控制。深入进行具有宽广弱磁调速范围的永磁同步电动机本体结构与弱磁控制方法的研究，一直是国内外学者在永磁同步电动机驱动系统领域研究的热点问题之一。

基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机在电动机本体结构上，能够实现自适应无源弱磁。电动机转速越高，励磁回路的磁阻越大，从而气隙磁通越小。基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机具有弱磁控制方法简单、转速调节容易、宽调速范围和高效率等优点，为永磁同步电动机驱动系统调速性能的提高提供了一种新的行之有效的方案。在电动车辆驱动系统、电主轴系统和变速发电等领域具有良好的应用前景。

全书共分为 5 章，由李春艳著并负责全书的统稿。第 1 章根据永磁同步电动机转子结构的特点，从原理上解释了永磁同步电动机弱磁困难的原因。从电动机本体结构和控制方法上介绍了永磁同步电动机弱磁技术国内外的研究现状。第 2 章从基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机特殊的转子结构入手，建立了磁路模型，推导了影响弱磁范围的主要参量，阐述了基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机的弱磁机理。第 3 章探讨了作用在永磁体槽中可移动的主永磁体上的磁场力的变化规律，由作用在主永磁体上的力决定其在槽中的位置来影响励磁回路的磁阻，构建了主永磁体受力分析模型，分析了主永磁体在槽中位置、非磁性体、主永磁体尺寸和气隙长度等参数对磁场力产生的影响。第 4 章主要研究了主永磁体在槽中的运动规律和气隙磁场调节特性，分析了空载反电动势和主永磁体运动之间的关系以及在增速与降速两个过程中的差异，并进行了样机的空载反电动势测试，仿真分析和实验测试了基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机的弱磁效果和工作特性。第 5 章分析了基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机的参数及其对弱磁范围的影响。漏磁系数与直交轴电感的变化规律，可为基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机的设计提供理论依据，在电动机参数分析的基础上研究了电动机参数变化对弱磁性能的影响，最后陈述了研究工作总结和未来工作的展望。

本书得到国家自然科学基金青年基金（项目编号：51307045，宽弱磁调速范围的

永磁同步电机及其控制方法研究)和黑龙江省自然科学基金(项目编号:QC2014C059,项目名称:自适应无源弱磁永磁同步电机研究)资助出版。

在本书撰写过程中,得到了哈尔滨工业大学程树康教授和寇宝泉教授的支持和指导,并参阅了书末所列的参考文献。在此,一并谨致诚挚的谢意。

本书既可供从事永磁电动机相关研究和应用的科研人员和工程技术人员使用,也可以作为高等学校相关专业研究生的学习参考书。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者提出宝贵意见,以便于本书的修订和完善。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 永磁同步电动机弱磁研究的目的和意义	1
1.2 永磁同步电动机的弱磁原理分析	2
1.2.1 几种典型结构永磁同步电动机的转子特点	2
1.2.2 弱磁概念的提出	3
1.2.3 永磁同步电动机弱磁控制的方法	4
1.2.4 制约永磁同步电动机弱磁调速范围的主要因素	5
1.3 永磁同步电动机弱磁技术的国内外研究现状	7
1.3.1 从电动机本体设计角度分析永磁同步电动机的弱磁研究现状	7
1.3.2 从电动机控制角度分析永磁同步电动机的弱磁控制研究现状	15
1.4 本书的主要研究内容	17
第 2 章 基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机结构及弱磁机理	18
2.1 基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机结构	18
2.1.1 电动机定子结构	19
2.1.2 电动机转子结构	19
2.2 基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机的 d-q 轴数学模型	22
2.3 基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机磁路模型	25
2.3.1 永磁体等效模型	25
2.3.2 外磁路等效模型	26
2.3.3 基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机空载等效磁路图	27
2.4 基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机的弱磁机理分析	31
2.4.1 基于磁路法的弱磁机理分析	32
2.4.2 基于相量图的弱磁机理分析	33
2.5 本章小结	35
第 3 章 基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机转子主永磁体受力分析	37
3.1 作用在主永磁体上的外力分析	37
3.2 作用在主永磁体上的离心力与摩擦力分析	38
3.2.1 离心力分析	38
3.2.2 摩擦力分析	39
3.3 作用在主永磁体上的磁场力分析	40

3.3.1	磁场力定性分析	40
3.3.2	磁场力定量计算	46
3.4	主永磁体发生故障时磁场力分析	55
3.5	本章小结	56
第4章	基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机的气隙磁场调节特性	57
4.1	主永磁体运动特点	57
4.2	空载气隙磁通密度分析	58
4.2.1	空载气隙磁通密度跟随主副永磁体之间的距离 s 的变化规律	58
4.2.2	电动机空载气隙磁通密度在增速和降速过程中的差异	59
4.3	空载反电动势分析	60
4.3.1	反电动势系数与速度的关系	60
4.3.2	主永磁体向上运动过程中反电动势与速度的关系	62
4.3.3	主永磁体向下运动过程中反电动势与速度的关系	63
4.3.4	空载反电动势仿真分析	65
4.3.5	空载反电动势实验测试	66
4.4	基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机的弱磁效果与性能研究	73
4.4.1	弱磁过程中电动机磁场的仿真分析	73
4.4.2	弱磁过程中电动机的性能测试	77
4.5	本章小结	80
第5章	基于变磁阻调节机理的永磁同步电动机参数及其对弱磁范围的影响分析	82
5.1	漏磁系数分析	82
5.1.1	电磁参数计算模型	82
5.1.2	漏磁系数的计算方法与影响因素分析	83
5.1.3	基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机极间漏磁系数计算	85
5.2	电感参数分析	89
5.2.1	影响直交轴电感因素	89
5.2.2	基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机直交轴电感计算	92
5.3	电动机参数变化对弱磁能力的影响	97
5.3.1	定子匝数对永磁同步电动机最高转速的影响	97
5.3.2	永磁体厚度对弱磁扩速范围的影响	99
5.3.3	非磁性体形状对弱磁扩速范围的影响	100
5.4	本章小结	101
	研究总结和展望	102
	参考文献	104

Contents

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Purpose and significance of research on flux weakening	1
1.2 The analysis and principle of flux weakening for PMSM	2
1.2.1 The feature of some typical PM rotors	2
1.2.2 The presentation of flux weakening conception	3
1.2.3 The method of flux weakening for PMSM	4
1.2.4 The difficulty of flux weakening for	5
1.3 Summary of flux weakening technology at domestic and abroad	7
1.3.1 Review of of flux weakening for special PMSMs	7
1.3.2 Review of flux weakening from the aspect of motor control	15
1.4 Study contents of the book	17
Chapter 2 The structure and and flux weakening principle of VMRPMSM	18
2.1 The structure of the VMRPMSM	18
2.1.1 The stator	19
2.1.2 The rotor	19
2.2 The d-q mathematical model of the VMRPMSM	22
2.3 The magnetic circuit model of the VMRPMSM	25
2.3.1 The equivalent model of the permanent magnet	25
2.3.2 The equivalent model of the external magnetic circuit	26
2.3.3 The equivalent no-load magnetic circuit model of the VMRPMSM	27
2.4 The flux weakening principle of the VMRPMSM	31
2.4.1 The flux weakening principle analysis based on the method of magnetic circuit	32
2.4.2 The flux weakening principle analysis based on the vector diagram	33
2.5 Summary	35
Chapter 3 The force analysis on permanent magnets of the VMRPMSM	37
3.1 The external force analysis on main permanent magnet	37
3.2 The centrifugal force and friction force analysis on permanent magnet	38
3.2.1 The centrifugal force analysis	38
3.2.2 The friction force analysis	39

3.3	The electromagnetic force analysis on main permanent magnet	40
3.3.1	The qualitative analysis of the electromagnetic force on main PMs	40
3.3.2	The quantitative analysis of the electromagnetic force on main PMs	46
3.4	The analysis of the electromagnetic force when the PMs get out of order	55
3.5	Summary	56
Chapter 4 The performance of air gap magnetic field adjustment for the VMRPM SM		
4.1	The movement characteristics of the main permanent magnet	57
4.2	The analysis of no-load air gap magnetic density	58
4.2.1	The no-load air gap magnetic density varies with the distance s between the main permanent magnet and secondary permanent magnet	58
4.2.2	The difference of the no-load air gap magnetic density in the raising speed and reducing speed process	59
4.3	The no-load back EMF analysis	60
4.3.1	The relationship between no-load back EMF coefficient and speed	60
4.3.2	The relationship between no-load back EMF and speed when the permanent magnet moves upward	62
4.3.3	The relationship between no-load back EMF and speed when the permanent magnet moves downward	63
4.3.4	The simulation analysis of the no-load back EMF	65
4.3.5	The experiment test of the no-load back EMF	66
4.4	Flux weakening result and the performance research on the VMRPM SM	73
4.4.1	The magnetic field simulation in the process of flux weakening	73
4.4.2	The performance test in the flux weakening process	77
4.5	Summary	80
Chapter 5 The parameters of the VMRPM SM and the analysis of the effect of the parameters on flux weakening		
5.1	The leakage coefficient analysis	82
5.1.1	The calculation model for the electromagnetic parameters	82
5.1.2	The calculation method and the influencing factor analysis of leakage coefficient	83
5.1.3	The calculation of the interpolar leakage coefficient	85
5.2	The inductance analysis	89
5.2.1	The influencing factor of the d-q axis inductance	89

5.2.2	The calculation of the d-q axis inductance	92
5.3	The effect of the parameter variation of VMRPMSM on the ability of flux weakening	97
5.3.1	The effect of the winding coil turns on the maximum speed	97
5.3.2	The effect of thickness of the permanent magnet on flux weakening	99
5.3.3	The effect of the non-magnetic conductor on flux weakening	100
5.4	Summary	101
Conclusion and future prospect		102
References		104

第 1 章 绪 论

1.1 永磁同步电动机弱磁研究的目的和意义

随着稀土永磁材料和永磁电动机技术的发展,近年来,具有体积小、重量轻、效率高、功率因数高和控制特性好等优点的永磁同步电动机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)得到了深入研究和广泛应用^[1-5]。随着变频技术的日趋完善^[6-9],永磁同步电动机与变频控制实现了机电一体化,永磁同步电动机驱动系统的优势越来越明显。永磁同步电动机采用高性能的稀土永磁体产生主极磁场,可使电动机的运行效率和功率因数大幅度提高,并且系统调速精度高,调速范围宽,输出特性硬,运行平稳,还具有恒转矩输出和转速不随负载波动的特性,可使其输出转速保持恒定,在某些机械传动系统中可省去减速器,实现直接驱动,这无疑会给整个机械制造行业带来一场新的革命。随着材料技术、计算机技术、电力电子技术、结构工艺技术和控制技术的进步,永磁同步电动机正在向大功率化、高速化、高性能化和微型化方向发展^[10,11],永磁同步电动机驱动系统正被广泛应用于航空航天、交通、能源、机械制造、石油、冶金、食品、印刷、包装、造纸、造船、塑料、纺织化纤和军工等领域及行业。

但是,由于永磁同步电动机通常采用高性能的稀土永磁体励磁,磁场调节困难。在基速以上的恒功率运行区域,随着转速升高,电动机的反电动势逐渐增大,由于供电电压的限制及电流控制器的饱和和影响,无法使电动机运行到更高的转速区域,这限制了永磁同步电动机的应用范围。若增大去磁性质的直轴电流对电动机进行弱磁控制,将致使电枢电流增大,铜耗增加,系统效率降低,限制了系统调速范围的进一步拓宽。

因此,充分发挥永磁同步电动机驱动系统高效率的特长,在现有基础上进一步拓宽其调速范围,提高基速以上区域的电动机运行效率是变频驱动系统的一个重要研究方向。基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机在弱磁运行时相同转速值输出的转矩更高,电动机的转速范围更宽。由于其通过转子主永磁体在槽中运动调节励磁回路的磁阻,速度越高,气隙磁通密度越低,因此采用该电动机拖动系统将具有更低的铁耗和更高的效率。基于变磁阻磁场调节机理的永磁同步电动机驱动系统在数控机床、电动车、变频空调、纺织机械、电气化铁路和风力发电等领域具有广泛的应用前景。

1.2 永磁同步电动机的弱磁原理分析

1.2.1 几种典型结构永磁同步电动机的转子特点

典型结构永磁同步电动机的转子根据永磁体在转子中摆放的位置可以分为表面式永磁体转子结构和内嵌式永磁体转子结构。表面式永磁体结构又分为表面粘贴式和表面插入式两种类型。内嵌式永磁体结构按照永磁体充磁方式又分为切向式和径向式两种类型。典型永磁同步电动机转子结构如图 1-1 所示。

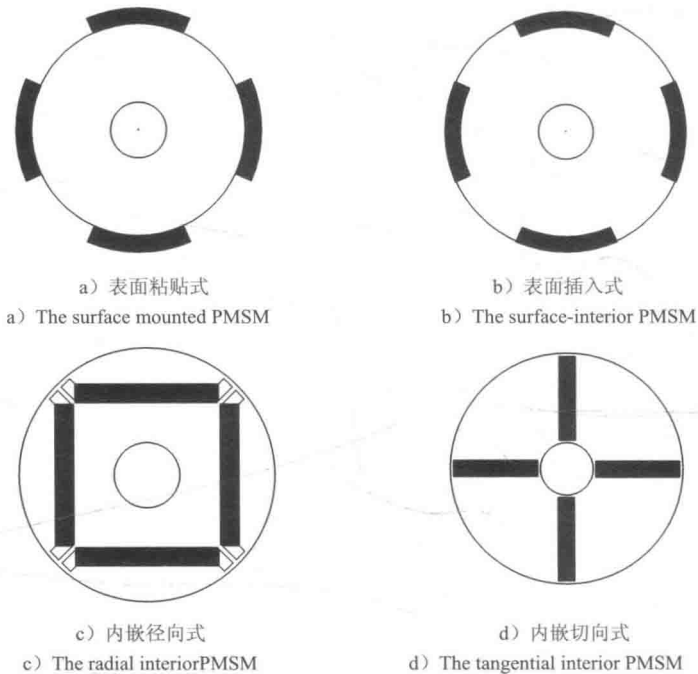


图 1-1 典型永磁同步电动机转子结构

Fig.1-1 The typical rotors of permanent magnet synchronous motor

采用图 1-1a 所示的表面粘贴式永磁体转子结构，永磁同步电动机的直轴电感和交轴电感在数值上相同。由于永磁体的磁导率很低，等效气隙大，因此电枢反应去磁能力有限，恒功率范围很小，并且这种转子结构高速运行时为了安全需要保护套筒或缠无纬玻璃丝带，但表面粘贴式永磁同步电动机结构最简单，成本最低，这种电动机结构中转子内部不需要笼条或永磁体，转子直径通常较小，有利于减小电动机的转动惯量，因此这种结构更适用于伺服系统。图 1-1b 所示的表面插入式永磁体结构，永磁同步电动机转子中永磁体更稳定，可以利用转子磁路的

不对称性所产生的磁阻转矩，提高电动机的功率密度和动态响应能力。利用转子圆周表面上磁阻分布不均匀的特点可以扩大电动机的转速范围，但是由于交轴电感与直轴电感之差来源于永磁体的厚度而非特别设计，因此交直轴电感的差异很小，扩速能力有限。图 1-1c、d 所示的内嵌式永磁体结构的永磁同步电动机转子中永磁体嵌入转子铁心内，沿圆周方向上磁阻分布不均匀。电动机的电磁转矩分为永磁转矩与磁阻转矩两部分。内嵌式永磁同步电动机和表面式永磁同步电动机相比等效气隙小，相对来说有利于弱磁，并且气隙磁通密度高，这种转子结构的永磁同步电动机可以充分利用磁阻转矩，因此它比表面式永磁同步电动机产生更大的转矩，同时内嵌式永磁体结构转子铁心能够在高速运行时有效保护永磁体不受离心力的破坏，并减少不可逆退磁的危险。此外，内嵌式永磁同步电动机的气隙磁通易于实现正弦分布，从而有效降低齿槽转矩，因此在需要宽调速范围应用时的永磁同步电动机的研究中多采用内嵌式永磁体转子结构。永磁同步电动机的弱磁研究主要集中在选择参数搭配更合理更适合电动机弱磁扩速运行的电动机转子磁路结构，以及选用更准确更可靠的电动机弱磁控制策略和系统硬件上。

1.2.2 弱磁概念的提出

以直流电动机为例，在电动机基速以下运行时可以通过改变电压占空比来改变电动机端电压实现调压调速。但当转速达到额定转速时，电压占空比已达到 1，端电压最大，此时必须采用其他方式来实现调速。根据直流电动机电动势方程可知

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1-1)$$

式中 E_a ——电动机绕组感应电动势，单位为 V；

C_e ——电动势系数；

Φ ——每极磁通，单位为 Wb；

n ——电动机转速，单位为 r/min。

电动机相电流为

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a} \quad (1-2)$$

式中 U ——电动机端电压，单位为 V；

R_a ——电动机相电阻，单位为 Ω ；

I_a ——电动机相电流，单位为 A。

电动机电磁转矩为

$$T_e = C_M \Phi I_a \quad (1-3)$$

式中 T_e ——电磁转矩，单位为 $N \cdot m$ ；

C_M ——转矩系数。

电动机绕组感应电动势 E_a 随着转速 n 升高而增大，端电压 U 保持不变，电枢绕组相电流随着反电动势的升高而减小。转矩 T_e 随着电枢电流 I_a 的减小而减小。如果保持每极磁通恒定，则转速升高电动机转矩迅速衰减。为了在高速下仍然能得到一定的电动机输出功率，需要控制每极磁通 Φ ，使之适当减小以降低高速下反电动势值，确保相电流 I_a 不会因转速升高迅速衰减，从而保证电动机高速运行时仍有较大的输出功率，这种为了提升转速而减小磁通 Φ 的控制方法被称为弱磁控制。

1.2.3 永磁同步电动机弱磁控制的方法

电动机反电动势和速度成正比，当电动机端电压随转速升高到逆变器能够输出的最大电压之后，继续提高转速，永磁同步电动机将无法再做恒转矩运行，此时，要设法减小永磁同步电动机的相反电动势，即弱磁控制，从而获得更高的转速范围。和电励磁同步电动机不同，永磁同步电动机的励磁磁动势因由永磁体产生而无法调节，由图 1-2 所示的永磁同步电动机的相量图可知，通过调节定子电流直轴去磁分量，利用电动机的电枢反应去磁作用，以电动机气隙磁场减弱来等价于直接减弱励磁磁场达到弱磁增速的目的^[12-16]，这就是永磁同步电动机弱磁的方法。

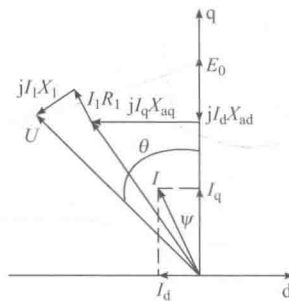


图 1-2 永磁同步电动机相量图

Fig.1-2 The vector diagram of permanent magnet synchronous motor

调节定子电流增大电枢反应的去磁作用，可以从增加电动机直轴去磁电流分量和减小交轴电流分量两个方面实现，以维持电压平衡关系，都可得到“弱磁”效果。由于电动机相电流也有一定极限^[17-19]，增加直轴去磁电流分量而同时保证电枢电流不超过电流极限值，交轴电流分量就相应减小。减小电枢电流的交流分量，从而减小其电枢反应的助磁作用，这种弱磁能力的大小与交轴电感成正比。这一等效弱磁措施能够扩展电动机恒转矩调速范围之外的调速范围，即弱磁范围，但它以牺牲恒转矩调速范围和输出转矩为代价，其能力的大小对电动机的总调速

范围没有多大影响。相反,随着这种能力的增大,交轴电抗增大,恒转矩范围变窄,弱磁范围变宽,电动机总的调速范围会有所减小,电动机的输出转矩特性会越来越弱,因此大部分文献上研究弱磁原理的弱磁增速的过程实际上是一个保持线电压不变的情况下,降低输出转矩的过程,也就是调整交轴和直轴的电流分量在受限范围内的分配关系。

但是,增大直轴电枢电流,会增加铜耗,系统效率会有所下降,并且过大的直轴电流会引起不可逆退磁^[20],破坏了电动机的性能,这些负面效果限制了系统调速范围的进一步拓宽。

1.2.4 制约永磁同步电动机弱磁调速范围的主要因素

1.2.4.1 电动机结构上的限制

在电流 $I \leq I_N$ 的情况下,能够获得宽广的弱磁范围的条件是:直轴电流为额定电流 I_N 时,直轴电枢反应去磁磁通能够刚好或者完全消弱永磁通(这里指基波分量)^[21]。这时电动机理论上可以在任意速度下弱磁运行,并输出基本恒定的功率。这一条件可以表述如下

$$E_0 \leq X_d I_N \quad (1-4)$$

式中 E_0 ——电动机在单位速度下的反电动势,单位为 V;

X_d ——电动机在单位速度下的直轴电抗,单位为 Ω ;

I_N ——电动机的额定电流,单位为 A。

永磁同步电动机弱磁扩速困难的原因在于其磁路结构的特殊性。虽然永磁同步电动机的转子结构多种多样,但无论是永磁体串联结构还是永磁体并联结构的转子,永磁体总是串联在直轴磁路中,并占去交轴磁路的部分空间,如图 1-3 所示。因此,交直轴磁路的等效气隙都很大,和电励磁同步电动机相比,直轴电抗 X_d 和交轴电抗 X_q 要小很多,并有 $X_d \leq X_q$,建立同样大小的电枢反应气隙磁场,永磁同步电动机的电负荷要比电励磁同步电动机大,而在正常的电负荷下,永磁同步电动机交直轴电枢反应非常小。如果永磁体提供正常的励磁磁场,则额定电流产生的直轴电枢反应磁通只能消弱永磁磁通的极小部分,用电动势关系表述为

$$E_0 > X_d I_N \quad (1-5)$$

不能满足永磁同步电动机产生宽广恒功率弱磁调速范围的条件,这也就是传统结构永磁同步电动机弱磁难的直接原因。为了满足产生宽广恒功率弱磁调速范围的方程,可以选择增大额定电流 I_N ,这样电动机铜损增大,且难以满足温升要求;或者减小 E_0 ,但就难以充分发挥永磁体高磁能积以及永磁同步电动机高转矩密度的优势。

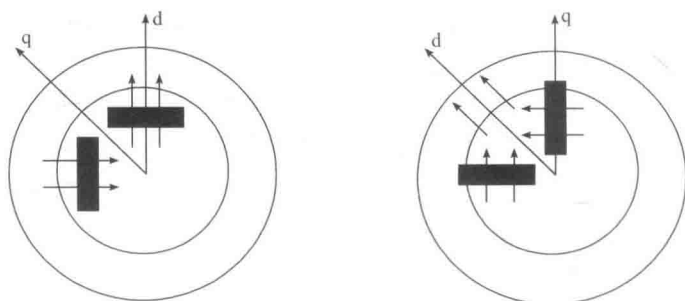


图 1-3 永磁体串联（左）和并联（右）结构

Fig.1-3 The series (left) structure and the parallel (right) structure of the permanent magnets

1.2.4.2 逆变器容量对永磁同步电动机速度范围的限制

电动机基速以下运行时，为保证恒转矩输出，需要保持磁通恒定，因而要求逆变器输出的电压频率比恒定。基速以上运行时，受逆变器输出电压已经达到最大值的限制，电动机需要弱磁运行。在弱磁运行模式下，电压矢量和电流矢量的幅值不能超过逆变器的额定值。电压极限椭圆和电流极限椭圆正是在此基础上形成的，如图 1-4 所示，它直观地描述了永磁同步电动机恒功率运行时转矩、转速以及逆变器运行条件和参数之间的关系，是这类电动机运行分析的有效工具^[22-24]。

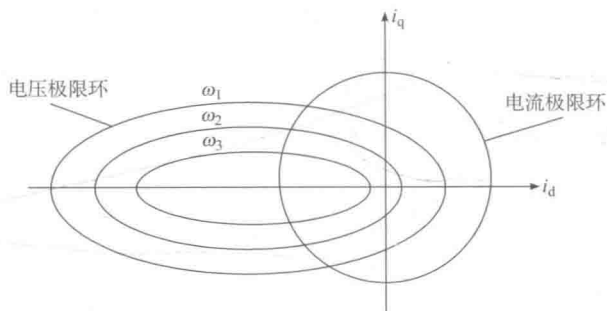


图 1-4 电压电流极限环 ($\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$)

Fig.1-4 The voltage and current limit circles ($\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$)

正弦波永磁同步电动机的控制运行与系统中的逆变器密切相关，电动机的运行性能受到逆变器的制约。最为明显的是电动机相电压有效值的极限值 U_{lim} 和相电流有效值的极限值 I_{lim} 要受到逆变器直流侧电压和逆变器最大输出电流的制约。当逆变器直流侧电压最大值为 U_c 时，Y 联结的电动机可达到的最大基波相电压有效值 U_{lim} 和 d-q 轴系统中电压极限值 u_{lim} 分别为

$$U_{lim} = \frac{U_c}{\sqrt{6}} \quad (1-6)$$

$$u_{\text{lim}} = \sqrt{3}U_{\text{lim}} \quad (1-7)$$

逆变器的电压电流限制条件为

$$\begin{cases} U_{\text{lim}}^2 \geq U_d^2 + U_q^2 \\ I_{\text{lim}}^2 \geq I_d^2 + I_q^2 \end{cases} \quad (1-8)$$

1.3 永磁同步电动机弱磁技术的国内外研究现状

在过去的十几年中，永磁同步电动机的弱磁控制研究逐渐深入，各种特种永磁同步电动机结构和弱磁控制方法层出不穷。本节主要从电动机本体结构以及电动机弱磁控制方法两个方面介绍永磁同步电动机在弱磁方向上的研究现状。

1.3.1 从电动机本体设计角度分析永磁同步电动机的弱磁研究现状

1.3.1.1 复合转子结构

永磁加磁阻式的复合转子是一种被学术界接受的有效弱磁的永磁电动机转子结构^[25-31]，图 1-5 为其中一种复合转子结构。奥地利的 W Muhlegger 和 W Teppan 学者首次提出在永磁同步电动机转子上加一段特殊的不对称铁心。永磁段铁心和磁阻段铁心两者之间有一定的间隙，以防止漏磁。永磁段转子采用普通的永磁体表面安装式结构，磁阻段转子具有多种多样的转子结构形式，如硅钢片与转轴平行叠装的交直轴磁阻异性转子（axially laminated anisotropical rotor, ALA）、开关磁阻电动机使用的凸极磁阻转子和交轴磁通障型转子等。而定子和普通永磁同步电动机相同，没有任何特别之处。在国内，也有很多学者研究过复合永磁转子的弱磁方案，还有的学者专门研究过永磁同步电动机永磁段转子长度的计算^[32]。研究表明：磁阻部分的长度占整个转子长度的 20%，就可以将永磁同步电动机的弱磁速度范围拓宽一倍。由于磁阻段转子的直轴电感大于交轴电感，弱磁控制时直轴电枢反应明显增强，从而增大弱磁效果，复合转子磁路结构永磁同步电动机是



图 1-5 复合转子结构^[32,33]

Fig.1-5 The compound rotor^[32,33]