

多单元永磁同步电动机

运行原理及容错运行特性

赵博 刘剑  编著

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

多单元永磁同步电动机 运行原理及容错运行特性

赵博 刘剑 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地阐述了多单元永磁同步电动机的理论、设计、分析、测试及运行基础问题，全书共分为8章，第1章阐述多单元永磁同步电动机发展现状和关键问题；第2章阐述多单元永磁同步电动机的数学模型；第3章阐述多单元永磁同步电动机的转矩特性及转矩波动；第4章阐述多单元永磁同步电动机的主要损耗分析；第5章阐述多单元永磁同步电动机转矩波动抑制策略；第6章阐述多单元永磁同步电动机温升计算及间接测量；第7章阐述多单元永磁同步电动机的协同控制技术；第8章阐述多单元永磁同步电动机中的定位力矩和波动力矩。本书所提出的理论与方法及得出的结论均为创新性成果，既丰富了电机专业的理论与技术，也对永磁同步电动机的发展具有重要的推动作用。

本书的读者对象为从事特种永磁同步电动机研究、设计与使用的科技工作者，读者需具备一定的电动机基础理论、电动机系统分析方法、有限元计算及电动机驱动控制等方面的相关知识。本书也可以作为高年级研究生的辅助教材或参考书。

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

多单元永磁同步电动机运行原理及容错运行特性 / 赵博, 刘剑编著. —北京: 电子工业出版社, 2020.1

ISBN 978-7-121-38187-4

I. ①多… II. ①赵… ②刘… III. ①永磁同步电机—运行 IV. ①TM351

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第278494号

责任编辑: 王羽佳 特约编辑: 刘炯 等

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 9 字数: 230.4千字

版 次: 2020年1月第1版

印 次: 2020年1月第1次印刷

定 价: 55.00元

凡所购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 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, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254535, wyl@phei.com.cn。

前 言

多单元永磁同步电动机系统,采用多个单元电动机协同控制,可以实现整机的大功率输出,充分利用了现有功率等级器件,实现数十甚至数百兆瓦的电驱动功率输出。多单元永磁同步电动机克服了功率器件不能满足大功率驱动的瓶颈问题,同时还具有容错运行能力,因此是大功率永磁同步电动机的发展方向,目前用于舰船推进等兆瓦级永磁同步电动机几乎无例外地采用多单元设计方案。然而,由于系统组成的特殊性,多单元永磁同步电动机具有其特殊的理论与技术问题,目前只见到部分相关论文,没有形成完整的理论与技术体系,更未见有相关的专著出版,对大功率永磁同步电动机的研究、设计、分析、测试和使用缺乏指导性的书籍。

该书具有如下特色:

(1) 理论与实践相结合。本书是在多年的科研工作基础上,总结归纳多单元永磁同步电动机的特殊问题,进行了系统、深入、全面的研究,形成了该电动机的理论基础,对该类电动机系统的研发、设计和使用具有指导意义。

(2) 内容系统、全面、完整。本书覆盖了电动机本体基础理论、设计方法、驱动与控制策略、分析与计算方法、性能评测等问题,形成了完整的体系,不但丰富了电动机专业的理论和知识,而且对此类电动机研究的方法具有参考价值。

(3) 创新性强。本书建立了完整的理论与技术体系,包括了多项创新性成果,提出了新的理论、新的技术和新的方法,对于深刻理解该类电动机的内部物理过程与现象、揭示其中的科学规律具有重要的作用,能有力地促进我国永磁同步电动机技术的发展。

本书系统地阐述了多单元永磁同步电动机的理论、设计、分析、测试及运行基础问题,揭示了多单元永磁同步电动机内部物理现象及耦合规律,提出了多单元电动机精确数学模型的建立方法,提出了单元电动机绕组对称的设计方法、绕组参数计算方法,建立了电动机容错运行转矩波动的抑制策略,形成了多单元永磁同步电动机系统分析体系,建立了多单元永磁同步电动机驱动与控制策略,提出了容错运行控制方法,针对大型电动机特性测试难度大的问题,提出了电动机系统特性的预测与评估方法。本书将多年的研究成果和工程经验总结成册,形成了多单元电动机及驱动系统的完整理论和技术体系,所提出的理论与方法以及得出的结论均为创新性成果,丰富了电机专业的理论和知识,对于永磁同步电动机的发展具有重要的推动作用。

多单元永磁同步电动机是大型电驱动系统的核心部件,本书作者及所在研究团队经过了多年的理论研究和工程实践,对其设计理念、控制策略、容错运行、测试方法、损耗抑制等多个方面体会深刻,取得的理论与技术成果在多项工程实践中得到了应用。

本书第1、2、3、4、5、8章由赵博编写,第6、7章由刘剑编写。全书由赵博和赵玫统稿。哈尔滨工业大学的李勇教授、尚静教授,山东理工大学的张存山教授在百忙之中对全书进行了审阅。在本书的编写过程中,陆永平教授、胡建辉副教授、刘承军副教授、赵猛副教授、王骞副教授、江善林副研究员、王宝超老师等提出了许多宝贵意见。此外,在成书过程中,还得到

了哈尔滨工业大学微特电机与控制研究所全体老师、研究生的帮助，以及西莫电机论坛各位版主的支持，电子工业出版社的王羽佳编辑为本书的出版做了大量工作。在此一并表示感谢！

本书的编写参考了大量近年来出版的相关技术资料，吸取了许多专家和同人的宝贵经验，在此向他们深表谢意。

本书的编写也得到了国家自然科学基金面上项目“新型双定子螺旋复合运动永磁执行器运行机理和解耦控制研究”（51577037）的资助，特在此对国家自然科学基金委表示感谢。

由于作者学识有限，书中误漏之处在所难免，望广大读者批评指正。

作者

2020年1月

目 录

第 1 章 多单元永磁同步电动机发展现状和关键问题	1
1.1 大型多单元永磁同步电动机的由来	1
1.2 大型永磁同步电动机与多单元永磁同步电动机的发展现状	2
1.2.1 大型永磁同步电动机的发展现状	2
1.2.2 多单元电动机和多相电动机的发展现状	4
1.2.3 多单元电动机和多相电动机的容错运行	7
1.3 多单元永磁同步电动机的关键问题	8
1.3.1 多单元永磁同步电动机的绕组排布	8
1.3.2 多单元永磁同步电动机的电感参数	8
1.3.3 多单元永磁同步电动机的转矩波动	9
1.3.4 大型多单元永磁同步电动机的测试问题	10
1.4 本书所阐述的关键问题	10
第 2 章 多单元永磁同步电动机的数学模型	12
2.1 引言	12
2.2 多单元永磁同步电动机系统结构与绕组连接方式	12
2.3 多单元永磁同步电动机数学方程	14
2.3.1 多单元永磁同步电动机的磁链方程	14
2.3.2 多单元永磁同步电动机运行时的电压方程	17
2.4 多单元永磁同步电动机的电感参数	18
2.4.1 绕组函数表达式	18
2.4.2 一个单元电动机内的绕组自感表达式	21
2.4.3 一个单元电动机内的绕组互感表达式	23
2.4.4 一个单元电动机内的三相绕组电感矩阵	29
2.5 多单元永磁同步电动机中不同单元间的互感矩阵	29
2.6 多单元永磁同步电动机绕组电感数值计算	31
2.6.1 单元电动机内部绕组电感计算	31
2.6.2 不同单元电动机间绕组互感计算	34
2.6.3 多单元电动机端部绕组互感计算	35

第 3 章 多单元永磁同步电动机的转矩特性及转矩波动	37
3.1 引言	37
3.2 多单元永磁同步电动机的转矩特性	37
3.2.1 部分单元电动机运行时的基本电磁转矩方程	37
3.2.2 全部单元电动机运行时的基本电磁转矩方程	38
3.2.3 多单元永磁同步电动机基本电磁转矩计算及试验	39
3.3 多单元永磁同步电动机容错运行时的转矩波动分析	41
3.3.1 1 个单元电动机运行时电磁转矩波动	41
3.3.2 2 个单元电动机运行时电磁转矩波动	43
3.3.3 3 个单元电动机运行时电磁转矩波动	46
3.3.4 4 个单元电动机运行时电磁转矩波动	48
3.3.5 5 个单元电动机运行时电磁转矩波动	49
3.4 不同数量单元电动机运行时电磁转矩波动比较	50
3.5 部分单元电动机运行时电磁转矩波动的测试	51
3.6 磁极嵌入深度对电磁转矩波动影响	53
第 4 章 多单元永磁同步电动机的主要损耗分析	55
4.1 引言	55
4.2 定子成型绕组的铜耗分析	55
4.2.1 成型绕组的铜耗计算	56
4.2.2 多匝成型绕组附加铜耗的抑制	58
4.3 永磁体磁极涡流损耗分析	63
4.3.1 空载时的磁极涡流损耗	63
4.3.2 负载时的磁极涡流损耗	64
4.4 定子铁心损耗分析	65
4.4.1 空载时定子铁心损耗计算	66
4.4.2 空载时定子铁心损耗试验	68
4.4.3 负载时定子铁心损耗计算	68
4.5 定子端板涡流损耗分析	69
第 5 章 多单元永磁同步电动机转矩波动抑制策略	71
5.1 引言	71
5.2 谐波电流注入法抑制转矩波动	71
5.2.1 正序谐波电流注入抑制转矩波动	72
5.2.2 负序谐波电流注入抑制转矩波动	74
5.2.3 正、负序谐波电流同时注入抑制转矩波动	76

5.2.4	谐波电流注入对转矩波动抑制的影响效果	76
5.3	新型绕组连接方式抑制转矩波动机理	78
5.3.1	新型绕组连接方式	79
5.3.2	新型绕组连接方式下的互感分析	80
5.4	新型绕组连接方式抑制转矩波动的数值分析	84
5.4.1	仅1号单元电动机运行时的转矩波动规律	84
5.4.2	仅5号单元电动机运行时的转矩波动规律	84
5.4.3	部分单元电动机相邻运行时的转矩波动规律	85
5.4.4	部分单元电动机间隔运行时的转矩波动规律	86
第6章	多单元永磁同步电动机温升计算及间接测量	87
6.1	引言	87
6.2	多单元永磁同步电动机温度场数学模型	87
6.2.1	三维瞬态温度场有限元模型	87
6.2.2	等效导热系数的处理	88
6.2.3	绕组铜耗热源的施加	89
6.2.4	定子铁耗离散热源加载方法	89
6.2.5	边界条件的确定方法	90
6.3	多单元永磁同步电动机瞬态温度场计算	93
6.3.1	空载运行时温度场计算	93
6.3.2	堵转运行时的温度场计算	95
6.3.3	额定运行时温度场计算	96
6.4	多单元永磁同步电动机的温升试验	97
6.4.1	空载运行时温升试验	97
6.4.2	堵转运行时温升试验	99
6.5	多单元永磁同步电动机温升的间接测试方法	100
6.5.1	温升间接测试方法原理研究	100
6.5.2	温升间接测试结果与计算对比	102
第7章	多单元永磁同步电动机的协同控制技术	104
7.1	引言	104
7.2	多单元永磁同步电动机的协同控制	104
7.3	多单元永磁同步电动机故障运行时的协同控制	107
7.4	多单元永磁同步电动机协同控制试验研究	109

第 8 章 多单元永磁同步电动机中的定位力矩和波动力矩	113
8.1 引言	113
8.2 多单元永磁同步电动机中的定位力矩	113
8.2.1 永磁同步电动机中的磁滞定位力矩	114
8.2.2 永磁同步电动机中的齿槽转矩波动	117
8.2.3 永磁同步电动机转子静态转矩平衡点	120
8.2.4 永磁同步电动机定位力矩中的非理想分量	121
8.2.5 永磁同步电动机定位力矩抑制	121
8.3 永磁同步电动机中的波动力矩	122
8.3.1 正弦波电流供电时的波动力矩	123
8.3.2 波动力矩与电流误差的关系	124
8.4 磁路饱和效应对波动力矩的影响	127
8.4.1 饱和效应对电动机内磁场的影响	128
8.4.2 由绕组反电动势分析饱和效应影响	130
8.4.3 饱和效应引起波动力矩的数值仿真	131
参考文献	133

第1章



多单元永磁同步电动机 发展现状和关键问题

1.1 大型多单元永磁同步电动机的由来

在低速大扭矩应用场合中,直驱式永磁同步电动机,因其无机械减速器环节整机系统结构紧凑,具备较高的转矩密度、较宽的调速范围及良好的低速平稳性等诸多优点而得到人们的重视。但是随着永磁同步电动机系统功率的增加,在永磁同步电动机相电压保持不变的前提下,每相绕组的电流将随之增加,这对外部电力电子器件的电流功率等级提出了更高要求,驱动系统成本增加,但可靠性却有所降低。为解决上述问题,多相绕组结构或多单元绕组结构的新型电动机及其驱动系统得到了越来越广泛的应用。多相电动机中每相绕组间相差一定的电角度,每相绕组激励源的相位角也相差对应的电角度;多单元电动机是在多台电动机并联运行基础之上衍生出的一类新型电动机,每个单元电动机外接一台独立工作的驱动器,各单元电动机的对应相绕组的电角度完全一致,多个单元电动机与多台驱动器并联运行。电力电子器件功率等级限制了永磁同步电动机单机容量的进一步增加,而多相化或多单元化结构的永磁同步电动机可通过增加电动机相数或单元电动机个数,在整机容量不变的前提下,降低每相绕组的电压和电流数值,降低对电力电子器件功率等级的要求。

直驱式永磁同步电动机采用多相或多单元结构之后,不仅降低了每相绕组的功率等级,降低了电子器件的功率等级,还提高了系统的可靠性,并使得电动机系统具备一定的容错能力。以舰船推进系统、海上石油钻井平台系统及其他工业用低速直驱场合的多相或多单元永磁同步电动机为典型代表。在该类工作环境中,要求系统无减速器,永磁同步电动机作为动力部件与负载直接相连接,实现低速大扭矩的输出,要求电动机具有较高的功率密度。

对于直驱式低速永磁同步电动机,因其无减速器环节,电动机在低速运行时的转矩波动将全部传递到负载端,形成直驱系统的机械振动和噪声,为抑制系统的振动和噪声,对低速直驱电动机的转矩波动提出了较高的要求。因多相或多单元永磁同步电动机本身具备一定的容错运行能力,还需进一步研究在故障发生时电动机的平稳过渡,例如多单元电动机部分单元运行

时的电磁转矩、转速的平稳性。为实现故障运行时的转矩平稳性,需根据多单元永磁同步电动机自身的数学模型及运行特点,不仅在电动机驱动器端,还可从电动机本体角度综合抑制在部分单元运行状态下的电磁转矩波动。

随着直驱式永磁同步电动机单机容量的逐渐增加,整机的系统测试所需的硬件条件也越来越苛刻,大功率的可调机械负载源、大容量电源等硬件条件均是一般企业所不具备的,且大容量电动机系统的测试电能的消耗也很大,尤其是整机的连续温升试验,其试验周期较长,当电动机容量较大时,驱动器和电动机本体的电能消耗也很大。而常用的双机对拖试验则需要制作两台完全一致的样机,也无形中增加了大容量电动机的试验成本。因此,还需要进一步研究大型多单元永磁同步电动机的间接测试和评价方法。

综上所述,在大功率低速直接驱动运行条件下,多单元永磁同步电动机具有极大的应用前景。作为大功率低速直驱式多单元永磁同步电动机的关键问题,其绕组电感、部分单元电动机运行时的转矩波动成因和抑制,以及整机的温升间接测试等问题的研究都具有极大的理论价值和实践意义。

1.2 大型永磁同步电动机与多单元永磁同步电动机的发展现状

1.2.1 大型永磁同步电动机的发展现状

在诸多大型永磁同步电动机使用环境中,最为典型的是电力推进电动机系统。本书以一台 2MW 低速大扭矩直驱式多单元永磁同步电动机为研究对象,所以有必要对大功率永磁同步电动机的发展进行综述。大功率永磁同步电动机的典型应用领域为电力推进电动机,在此对该领域电动机的发展做了较系统的综述。

第一艘电动推进试验船诞生于 1838 年,追溯至今已有 180 多年的历史。电力推进大功率电动机的发展可大致分为 3 个阶段。20 世纪 30 年代直流有刷电动机曾经尝试被应用到舰船推进领域之中,随之而来的是直流调速电力推进系统在推进领域的发展阶段,但是直流有刷机因换向困难、维护成本高及整机结构较为复杂,电动机容量受限制等诸多不利因素而未被广泛应用。20 世纪 70 年代,电力电子器件及其相关的交流调速系统技术得到了极大的突破,电子器件的功率等级得到了极大的提升,原有的直流电动机及直流调速系统所存在的固有缺陷得以克服。许多大功率推进电动机被用于军事和经济领域。20 世纪 90 年代至今是第 3 个阶段,新型的电力推进电动机得到了极大程度的发展,电力推进系统已被广泛商业化,推进电动机及其驱动系统的单机容量逐渐增加。除传统大功率永磁同步电动机之外,大功率超导电动机也被广泛关注。近 30 年来,各类大功率推进电动机在商用领域范围内,已经达到近 30% 的覆盖率。而在军用领域,以大功率永磁同步电动机为核心的综合全电力推进系统(Integrated Full Electric Propulsion System)被提出,并得到了众多专家的高度重视。

在当今的交流推进领域内,最为典型的推进电动机为多相异步电动机、多相电励磁同步电动机和多相永磁同步电动机三大类,其中永磁同步电动机作为新兴电力推进电动机得到了越来越广泛的应用。相比于异步电动机,永磁同步电动机具有功率因数高、整机效率高、控制系统简洁可靠等优点,而相比于电励磁同步电动机,永磁同步电动机转子无励磁绕组,其励磁损

耗小,结构简单,整机体积和重量均相对较小。但是永磁同步电动机本身也具有一定的不足之处,如永磁体对工作温度有一定要求,大功率永磁同步电动机在装配、检修等方面较感应电动机和电励磁同步电动机复杂很多。

发达国家对电力推进永磁同步电动机的研究开展较早,取得的成功也较为突出。俄罗斯较早提出内置式切向磁路结构的电力推进永磁同步电动机,并已装备俄罗斯海军舰船使用,其结构如图 1-1 所示。

该电动机的优点是采用内置式磁钢,转子的机械强度较高,整机结构可靠性较好,但相对于表贴式转子,内置磁钢结构的转子漏磁通相对较大。

德国西门子研制 PERMASYN 型表贴式永磁推进电动机,该类电动机具有结构简单、整机噪声振动较小、效率相对较高、功率密度大等优点。此外,电动机和驱动器采用了一体化设计,将驱动器放置在机壳体外密封体内,同时该电动机的定子绕组采用 12 相波绕组拓扑结构,多相绕组设计使得整机具备容错运行的能力,大大增强了系统的可靠性。该类电动机的样机如图 1-2 所示。

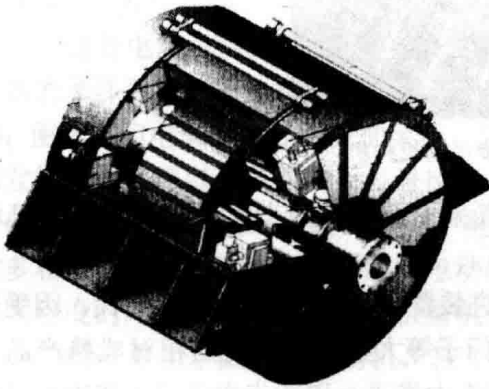


图 1-1 内置式切向磁路结构永磁同步电动机

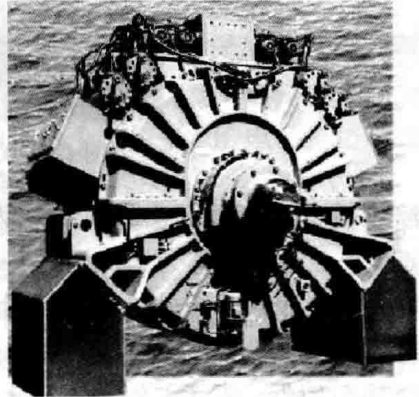


图 1-2 西门子 PERMASYN 型永磁推进电动机

PERMASYN 型电力推进永磁同步电动机的输出功率可以从 1.7MW 做到 5MW,该永磁同步电动机被德国军方作为电力推进系统的核心部件装备到常规潜艇之中。除此之外,德国西门子公司还成功研制了最大功率等级为 14MW、额定转速为 150r/min 的 SSP 吊舱式永磁电力推进器,该类推进器样机具有尺寸小、重量轻等优点,被广泛应用于游轮和潜艇的辅助推进之中。

瑞士的 BBC 公司早在 1986 年就为瑞典的潜艇研发功率等级为 1.5MW、额定转速为 180r/min 的电力推进永磁同步电动机。之后 ABB 公司在此基础上研制了 0.4~5MW 功率范围内的永磁同步电动机系列,并将其应用在 ABB 新研制的“Compact Azipod”吊舱式电力推进系统中。

在 1987 年,法国热蒙-施耐德工业公司成功研制了一台功率等级为 0.4MW、额定转速为 500r/min 的电力推进永磁同步电动机样机。在此基础上,该公司于 1996 年开发完成了功率等级为 1.8MW、额定转速为 180r/min 的 12 相电力推进永磁同步电动机及其驱动控制系统,并且完成了整机的相关试验工作。后续该公司还成功研制了功率等级为 3.3MW 的电力推进永磁同步电动机,并装备该国海军潜艇使用。

1994 年,美国卡曼公司研制了一台功率等级为 2.24MW (换算为 3000hp) 的多相永磁同步电动机模样机型。1999 年该公司在之前的模型样机技术基础之上又成功开发出一台

18.375MW 大功率六相推进永磁同步电动机。该电动机外径达到 4.3m，长度达到 1.37m，其额定转速为 100r/min，电动机系统效率为 95%，样机本体部分的重量达到 27.2t。

国内对电力推进永磁同步电动机研究的起步相对较晚。沈阳工业大学唐任远院士最早提出了内置式具有自启动功能的永磁同步电动机。该样机的标称功率为 1.12MW，因转子具有鼠笼绕组，所以该永磁同步电动机具有自启动的能力。

2005 年 9 月，武汉船用电力推进装置研究所成功研制了三相 0.6MW 电力推进永磁同步电动机，并进行了相关的样机试验，该样机如图 1-3 所示。

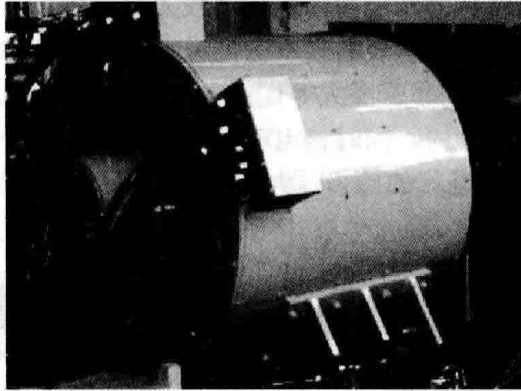


图 1-3 0.6MW 永磁同步电动机样机

后续该研究所还开发出标称功率为 1MW 的直流无刷永磁同步电动机，但是未见相关论文报道。

可以看出，相对于国外，我国舰船采用电力推进装置始于 20 世纪的 90 年代，因受国外的技术封锁，国内舰船行业主要采用的是 ABB、西门子等大型跨国公司的相对成熟产品，国产化程度相对较低。表 1-1 列举了部分 2000 年以来电力推进永磁同步电动机在我国民用舰船上的应用案例。

表 1-1 永磁同步电动机在国内舰船电力推进器的部分应用案例

装备的舰船	装备时间	单机功率/MW
中海油蓝疆号起重船	2000 年	3
中远泰安口号半潜船	2002 年	4.3
中海油海洋石油 623 号平台守护船	2004 年	2.2
中国科学院小水面科考船	2008 年	1.7

1.2.2 多单元电动机和多相电动机的发展现状

多相电动机多指定子绕组相数大于 3 时的特种电动机，常见的是多相感应电动机、多相电励磁同步电动机及多相永磁同步电动机等。除传统的多相电动机之外，还有许多新型磁路结构的多相电动机，如多相盘式电动机、多相横向磁通电动机、多相开关磁链电动机等新型多相电动机。

随着 20 世纪中叶的新型电子器件的开发及电力电子技术的日渐成熟，科技工作者对多相电动机及其控制系统进行了进一步深入的研究。早在 1969 年，学者 E. E. Ward 的论文中已具

体研究了采用多相逆变器驱动的五相感应电动机。但是多相电动机的研究热潮发生在最近的二三十年内,因此多相电动机的优化设计方法、多相电动机驱动电路拓扑及多相电动机的控制策略等相关问题至今仍是众多学者的研究热点。

与传统的三相电动机及其驱动系统横向比较不难发现,多相电动机具有较为显著的特点,主要体现在以下几个方面:

(1) 随着电动机绕组相数的增加,在整机满负荷运行时,由饱和引起的转矩波动次数将有所增加,且转矩波动的幅值将同比下降。所以,在低速直驱条件下,多相电动机的转矩波动相对较小,整机的振动和噪声将有所降低。

(2) 在保证整机大功率连续运行的条件下,通过增加绕组相数,可以降低对功率器件电压和电流等级的要求,降低驱动系统的硬件成本;避免了传统三相电动机为实现大功率输出,需解决多个功率器件串并联后的静态和动态均压、均流等技术难题。

(3) 因电动机相数较多,在某些相绕组发生开路故障时,可以直接将对应相绕组的开关直接关闭,通过调整其他工作相绕组的电流相位和幅值,在保证气隙磁场为圆形磁场的前提下,可实现多相电动机的缺相运行,从而提高了电动机系统的可靠性和安全性。

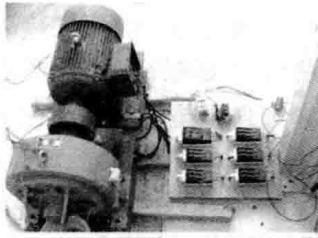
(4) 随着电动机绕组相数增加,系统的控制方程较为复杂,控制量较多,运算量较大,控制器的硬件和软件设计难度也随之提高。这是多相电动机的弊端之一,但是也正因为控制量增加,使得多相电动机的控制更加灵活,空间矢量中的矢量个数更多,给电动机控制提供了较大的发挥空间,可以更好地发挥先进控制方法的优异作用。

(5) 随着电动机绕组相数的增加,电动机内部的谐波磁场含量将得到较大程度的抑制,因此多相电动机内部谐波磁场引起的电动机磁极涡流损耗、定子铁心损耗及附加铜耗等都将得到较大程度的降低,使得多相电动机整机效率有所提升,材料利用率有所增加。

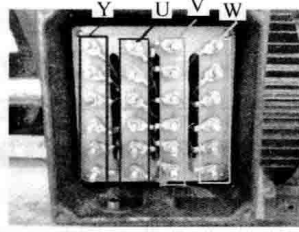
(6) 对于多相永磁同步电动机,转子磁极经过特殊外形设计后,气隙磁场将既含有基波磁场,还耦合一定分量的低次谐波磁场,在绕组电流中注入相应次数的低次谐波电流,谐波电流将与谐波磁场相互作用,提高整机的转矩密度。

国外,学者 D. C. White 采用对称分量法,对正弦绕组形式的多相电动机(包括感应电动机、同步电动机等)建立起相关的数学模型。该模型可以用来分析电动机内的谐波成分及电动机不对称运行工况。R. H. Helson 和 P. C. Krause 两位学者针对多套三相绕组的感应电动机进行了模型构建,每套三相绕组单独分析后再合成到一起,分析每套绕组的相角之差来与电动机电磁转矩纹波的关系。T. A. Lipo 和 H. A. Toliyat 针对集中绕组形式的多相感应电动机数学模型进行了相关研究,得到了集中绕组电感表达式。M. A. Abbas 采用广义 Park 变换建立六相感应电动机的数学模型并进行了相关验证。国内,哈尔滨工业大学的陆永平、李建春也采用了广义 Park 变换建立了 15 相直流无刷电动机的数学模型。浙江大学的黄进采用多回路法研究了多相感应电动机的电感参数,计算了在任意速度下的多相电动机参数并进行了相关试验验证。除此之外,清华大学、浙江大学、西安交通大学、华中科技大学、海军工程大学、中科院电工所、上海海事大学、哈尔滨工程大学和湖南大学等高校及研究所对多相电动机的数学模型及其相关电磁设计、多相电动机坐标变换和容错控制算法等方面展开了深入研究。

国外对多单元电动机的研究资料相对较少,在国内,沈阳工业大学学者对多单元感应(原文为多支路)电动机展开了较深入的研究,并制作了一台 15kW、6 单元的感应电动机,该样机及测试系统如图 1-4 所示。



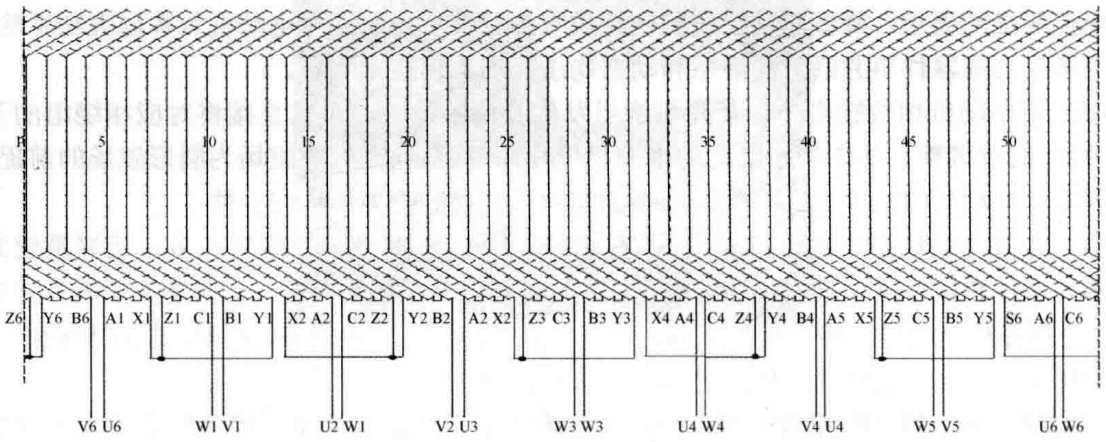
(a) 6单元感应电动机



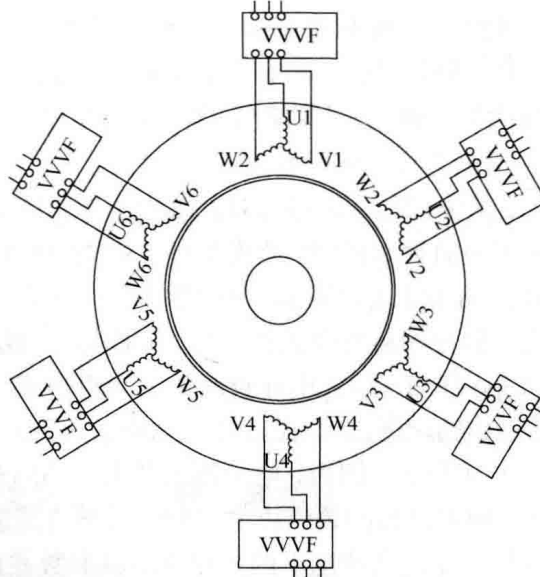
(b) 6单元电动机接线板

图 1-4 三相 6 单元感应电动机样机

该三相 6 单元感应电动机的绕组展开图和外部 6 台驱动器系统连接图如图 1-5 所示。



(a) 三相 6 单元感应电动机绕组展开图



(b) 三相 6 单元感应电动机系统图

图 1-5 三相 6 单元感应电动机绕组展开图和系统图

在三相 6 单元异步电动机基础之上，沈阳工业大学学者还设计了具备自启动能力的三相 6 单元永磁同步电动机系统，该永磁同步电动机的 6 个单元电动机外接 6 台驱动器，所有驱动器均由上位机进行统一控制，并采用锁相环技术，保证各单元电动机的输出功率达到一致。6

单元永磁同步电动机系统的控制示意图如图 1-6 所示。

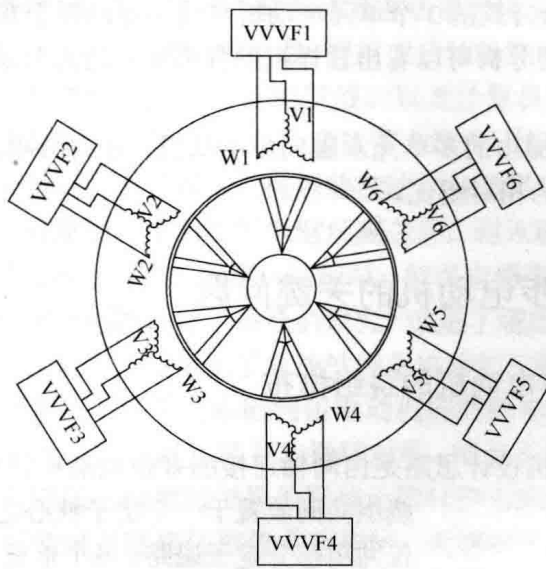


图 1-6 三相 6 单元感应电动机系统图

1.2.3 多单元电动机和多相电动机的容错运行

多单元电动机与多相电动机因其绕组排列形式不同，所以在数学模型、驱动方式、整机运行时转矩波动及容错运行时转矩波动成因等方面均有着本质上的不同，所以多单元电动机并不能等同于多相电动机。而无论是多相电动机还是多单元电动机，都具备一定的容错能力，但是又因为绕组拓扑连接方式的不同，其容错运行的方式也不尽相同。

学者 T. M. Jahns 的研究表明，对于多相系统，当相数较多时，若仅一相绕组出现故障，则对整个系统的稳定性影响较小。T. A. Lipo 等学者针对多相电动机，提出在多相电动机部分绕组发生故障后，剩余绕组相电流需满足的约束条件，其最终目的是保持缺相运行时的气隙磁场仍为圆形磁场。哈尔滨工业大学陆永平针对 15 相对称式绕组的直流无刷机缺相运行时的容错方式提出两种解决办法：①当一相绕组发生故障时，与之空间相差 120° 电角度的其余两相绕组也同时切除，此时气隙磁场仍可保证为圆形。②与 Lipo 的思路近似，当一相绕组故障时，通过调节其余相绕组电流的幅值和相位来获取圆形气隙磁场。采用每相绕组外加独立 H 桥驱动电路，方便任意相电流的实现。学者 C. B. Jacobina 由电动机故障时绕组相电压与逆变器电压间的关系出发，推导得到绕组故障时的各相电压表达式。学者 M. R. Hyung 采用前馈补偿的方式，对缺相运行的五相电动机实现了容错控制。

在多单元电动机中，若有一相绕组发生故障，则只需将该相绕组所在的单元电动机整体切除即可，剩余的单元电动机仍可维持整机的正常运行。张炳义、冯桂宏提出的三相 6 单元感应电动机在全部单元运行时等效为一台普通的三相感应电动机，而在部分单元运行时，将有两种情况，分别为空间对称单元电动机运行工况和空间不对称单元电动机运行工况。其中，当 1、2、4、5 个单元电动机运行时，均属于空间不对称单元运行方式，在该类工况下电动机气隙磁密并非圆形磁场，而是含有较大分量的谐波磁密，将会引起电动机的转矩波动和损耗增加。当 3 个单元电动机共同运行时，若 1 号、3 号和 5 号单元电动机或 2 号、4 号和 6 号单元电动机

共同运行,属于空间对称单元运行方式,此时气隙磁场为圆形磁场,电动机在该方式下将平稳运行;除此之外,其余组合方式的3个单元电动机共同运行均属于非对称运行方式,气隙中含有较多的谐波含量。由上述分析可以看出该样机的容错运行能力有限,且部分单元运行时电动机性能相对较差。

相比较而言,本书所提出的多单元永磁同步电动机,在部分单元电动机运行时的转矩平稳性相对较好,且容错能力相对更优。

1.3 多单元永磁同步电动机的关键问题

1.3.1 多单元永磁同步电动机的绕组排布

多单元永磁同步电动机设计思路是由同轴连接的多台电动机转化而来的,将多台电动机绕组共同放置于一个定子铁心之中,电气上彼此无连接,仅共用部分定子磁路。每个单元电动机又由多相电动机组成,在此,以三相5单元电动机的绕组拓扑结构为例,其示意图如图1-7所示。

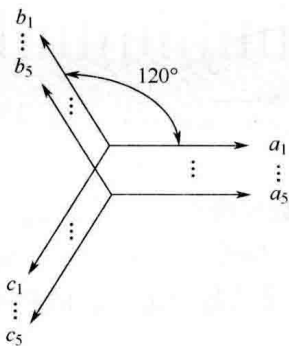


图1-7 三相5单元电动机绕组拓扑图

可以看出,不同单元电动机对应相绕组的轴线完全一致,若忽略不同单元电动机间的磁链相互影响,则多单元电动机可以直接看作多个三相电动机的线性叠加。可采用普通的三相电动机控制策略进行驱动。

因每个单元电动机的绕组仅占据部分定子铁心空间,所以单元电动机内三相绕组的互感将不再循环对称,互感不对称将产生转矩波动。除此之外,不同单元绕组在定子铁心内存在共磁路现象,不同单元绕组之间存在互感,并不能照搬传统的三相电动机电压方程、磁链方程等。每个单元电动机还可以设计为多相结构,组成多相多单元的新型结构电动机,该类电动机将兼具多相电动机和多单元电动机共同的优点,进一步提升了容错运行能力。

1.3.2 多单元永磁同步电动机的电感参数

电感参数是永磁同步电动机设计与计算的难点,而永磁同步电动机数学模型中又必须要求精确的电感参数,同时电感参数受到定子槽型、转子磁极、绕组排布形式、磁路材料非线性及磁路饱和度等诸多因素的影响,并且永磁同步电动机中,电感参数还随着转子转角改变而改变。此外,电感参数是分析多单元电动机的不同单元电动机间磁路耦合问题的基础,也是分析部分单元电动机运行时转矩波动的基础。

多单元永磁同步电动机属于永磁同步电动机的一种,而永磁同步电动机在电感参数计算方面的研究主要有如下的进展。

(1) 电感解析法计算。T. J. E. Miller 计算得到一个线圈的电感表达式,并按照一相绕组中各线圈之间的磁路耦合关系,计算得到了永磁同步电动机相电感的解析式。后续,Z. Q. Zhu