



电气工程系列丛书

RESEARCH ON  
DIRECT CURRENT  
BRUSHLESS GENERATORS OF  
STATOR EXCITATION

许泽刚 著

定子侧励磁型  
无刷直流发电系统研究



江苏大学出版社  
JIANGSU UNIVERSITY PRESS



电气工程系列丛书

本书由江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (TAPP, 项目负责人: 朱锡芳, PPZY2015B129)、常州工学院 - “十三五”江苏省重点学科项目 - 电气工程重点建设学科、2016 年度江苏省高校重点实验室建设项目 - 特种电机研究与应用重点建设实验室、江苏省“333 高层次 (第三层次) 人才培养工程”计划、江苏省高校自科基金重大项目 (17KJA470001) 资助出版

许泽刚

著

图书馆

# 定子侧励磁型 无刷直流发电系统研究



江苏大学出版社  
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江

## 图书在版编目(CIP)数据

定子侧励磁型无刷直流发电系统研究 / 许泽刚著

. — 镇江 : 江苏大学出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-5684-0693-2

I. ①定… II. ①许… III. ①定子—无刷励磁—直流发电机—研究 IV. ①TM33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 304065 号

### 定子侧励磁型无刷直流发电系统研究

Dingzi Ce Licixing Wushua Zhiliu Fadian Xitong Yanjiu

---

著 者/许泽刚

责任编辑/徐 婷

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

开 本/890 mm×1 240mm 1/32

印 张/5.875

字 数/186 千字

版 次/2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0693-2

定 价/36.00 元

---

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

## 前 言

混合励磁磁通切换(Flux-Switching Hybrid Excitation Machine, FSHM)电机继承了永磁磁通切换(Flux-Switching Permanent Magnet Machine, FSPM)电机的诸多优点,如转子上既无永磁体,也无励磁绕组,结构简单,适宜高速运行;永磁体切向安置于定子侧,易于散热和冷却,同时聚磁效应有助于提升功率密度。通过引入辅助电励磁绕组,有效拓宽了 FSPM 电机气隙磁场的调节范围,在风力发电、航空电源和车用电源等领域具有潜在的应用前景。本书的研究主要围绕 FSHM 电机的关键技术及其在无刷直流发电系统中的应用展开,主要成果包括以下几个方面:

本书首先对有无导磁磁桥、导磁磁桥相对位置差异的 FSHM 电机就初始磁密、磁链的正弦度、调磁能力和电枢反应进行对比研究,从而确定较为合理的电机结构。

依据 FSHM 电机磁链波形接近正弦分布特性,以建立电枢绕组磁链最大位置的单元电机非线性等效磁路模型(Nonlinear Magnetic Circuit Method, NMCM)为切入点,推导了峰值磁通表达式;鉴于关键磁路单元饱和程度对 NMCM 分析结果具有至关重要的影响,采用反正切函数拟合磁化曲线,同时借鉴磁网络法中迭代求解技术估算铁芯磁导率。有限元仿真结果验证了相关假设的合理性与所建模型的正确性。针对磁桥式 FSHM 电机提出的 NMCM,同样适用于 FSPM 电机和无桥 FSHM 电机的分析与研究。

基于 FSHM 单元电机的 NMCM,以合理配置永磁与电励磁用量为设计目标,研究了该电机的快速设计方法。针对调整磁桥厚

度对永磁体利用率和调磁系数存在相互矛盾的影响,提出按照连接强度选取磁桥厚度并将其初始磁密设置在磁化曲线拐点附近,据此推导了电励磁磁动势表达式;探讨了初始磁密不变时,永磁体材料用量和电机弱磁系数与定子轭高的关系,分析了永磁体径向宽度和增磁系数恒定的原因。设计并试制了额定转速为 1 200 转/分、输出相电压有效值为 220 V、额定功率 1.5 kW 的电机,样机测得的空载反电动势波形及调磁系数与理论分析结果吻合,验证了快速设计方法的正确性。

为了便于 FSHM 电机工作特性的分析和无刷直流发电系统的闭环控制,进行了 FSHM 电机的非线性建模研究。采用二维有限元进行了定子坐标系下的绕组自感与互感计算,并给出频谱分析结果;鉴于电感为励磁电流、电枢电流和转子位置的三维函数,电机建模及控制器设计存在诸多不便,转而采用与转子同步转速旋转的  $d-q$  坐标系来描述电压和磁链方程;在对励磁电流和直交轴电流分别扫描的基础上,利用二维曲线与双三次多项式分段拟合的方法构造电感曲面方程,并基于 MATLAB 建立了电机的直交轴电感仿真模型;为论证直接将电机电感用作 PWM 整流器储能电感的可行性,从阻感性负载矢量图出发,进一步建立了 FSHM 电机的外电路等效仿真模型。

为提高电机的运行效率和系统的输出控制性能,采用了 PWM 整流器作为 FSHM 无刷直流发电系统的整流电路。针对 PWM 整流装置因加装位置传感器而带来的成本增加、系统运行可靠性下降等问题,提出采用对频率、相位和电机参数变化不敏感的单周期控制(One-Cycle Control, OCC)技术作为无位置传感器直流发电系统的基本控制策略。从 OCC 稳定性、电枢电流谐波抑制和动态跟踪性能三方面要求探讨了将 FSHM 电机的等效合成电感用作变换器储能电感的可行性;结合简化小信号模型给出的电压开环传递

函数,直接采用相位裕度分析法得到了电压控制器参数,较常用的根轨迹设计法更为直观、便捷。基于外电路等效电机模型的仿真结果与样机实验结果验证了无位置传感器且无外置电感的无刷直流发电机 PWM 整流技术可行性和有效性。

由于作者学识有限,书中难免存在疏漏,恳请读者批评、指正。

著 者

2017 年 8 月

# 目 录

## 第1章 绪 论 001

- 1.1 无刷直流发电机的研究意义 001
  - 1.1.1 风力发电领域 001
  - 1.1.2 航空电源领域 003
  - 1.1.3 车用电源领域 004
- 1.2 无刷直流发电机的主要种类及研究现状 007
  - 1.2.1 异步电机 007
  - 1.2.2 开关磁阻电机 008
  - 1.2.3 定子励磁型永磁电机 009
- 1.3 混合励磁型磁通切换电机及其研究现状 016
  - 1.3.1 电机结构探索 017
  - 1.3.2 电磁参数分析与电机设计 021
  - 1.3.3 控制策略研究 022
- 1.4 研究的问题及其意义 022
- 1.5 研究思路和研究内容 023
  - 1.5.1 研究思路 023
  - 1.5.2 研究内容 024

## 第2章 混合励磁磁通切换电机结构及其工作原理 027

- 2.1 FSPM 电机结构及其工作原理 027
  - 2.1.1 FSPM 电机结构 027
  - 2.1.2 FSPM 电机工作原理及特点 028
- 2.2 FSHM 电机典型结构对比研究 034
  - 2.2.1 FSHM 电机的类型 034

2.2.2 8种 FSHM 电机电磁性能比较 035

2.3 本章小结 054

第3章 磁通切换电机的非线性等效磁路模型 055

3.1 电机性能定量分析方法 055

3.1.1 简单磁路法 055

3.1.2 等效磁网络法 056

3.1.3 有限元数值解法 058

3.2 非线性等效磁路模型 062

3.2.1 模型的建立 062

3.2.2 模型的简化 065

3.2.3 磁链与空载电势峰值估算 067

3.2.4 磁化曲线拟合 069

3.3 磁链与反电动势估算 070

3.4 本章小结 073

第4章 基于等效磁路模型的 FSHM 电机分析与设计 074

4.1 电机通用设计方法 074

4.1.1 电机尺寸方程 074

4.1.2 导磁磁桥厚度 076

4.1.3 电励磁绕组安匝数 079

4.1.4 永磁体尺寸与定子轭高 080

4.2 磁桥式 FSHM 电机算例 082

4.3 结构参数优化 086

4.3.1 定子齿根宽度 086

4.3.2 转子极宽 088

4.4 磁桥式 FSHM 样机设计数据 089

4.5 有限元仿真验证 091

4.5.1 气隙径向圆周磁密与磁桥平均磁密 091

4.5.2 三相单元电机建模方法 092

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 4.5.3 | FSHM 电机调磁特性与空载反电动势                   | 094 |
| 4.6   | 本章小结                                 | 095 |
| 第 5 章 | 磁桥式混合励磁磁通切换电机的电感分析及电机建模              | 097 |
| 5.1   | FSHM 电机的数学模型                         | 098 |
| 5.1.1 | 三相静止坐标系下的电压与磁链方程                     | 098 |
| 5.1.2 | $dq$ 旋转坐标系下的电压与磁链方程                  | 099 |
| 5.2   | 三相 $abc$ 与 $dq$ 坐标系下的电感计算            | 101 |
| 5.2.1 | $abc$ 坐标系下的电感计算                      | 101 |
| 5.2.2 | 转子坐标系下的电感计算                          | 111 |
| 5.3   | $dq$ 坐标系下的 Simulink 模型               | 118 |
| 5.4   | 基于外电路等效的电机模型                         | 122 |
| 5.4.1 | 合成电感的求解与拟合                           | 122 |
| 5.4.2 | 基于外电路等效的电压方程与 Simulink 模型            | 124 |
| 5.5   | 负载端电压仿真研究与实验验证                       | 125 |
| 5.6   | 本章小结                                 | 128 |
| 第 6 章 | 单周期控制的 FSHM 无刷直流发电机研究                | 130 |
| 6.1   | FSHM 发电机整流方案                         | 130 |
| 6.1.1 | 二极管不控整流方案                            | 130 |
| 6.1.2 | PWM 整流方案                             | 131 |
| 6.2   | 基于单周期控制的无位置传感器无刷直流发电机                | 134 |
| 6.2.1 | 单周期控制工作原理及特点                         | 135 |
| 6.2.2 | 基于单周期控制实现 FSHM 电机无位置传感器<br>PWM 整流的原理 | 137 |
| 6.2.3 | 发电机电感作为储能电感可行性分析                     | 142 |
| 6.2.4 | 电压控制器设计                              | 146 |
| 6.3   | 无位置传感器 PWM 整流 FSHM 电机的仿真与实验<br>研究    | 149 |
| 6.4   | 本章小结                                 | 154 |

第 7 章 总结与展望 155

7.1 研究总结及主要创新点 155

7.2 有待进一步研究的问题 158

参考文献 160

# 第1章 绪论

## 1.1 无刷直流发电机的研究意义

### 1.1.1 风力发电领域

目前我国能源系统高度依赖煤、石油和天然气等不可再生能源。以国务院《能源发展“十二五”规划》公布的2010年统计数据为例,非化石能源与一次能源生产总量比尚不足10%。化石能源消耗所排放的 $\text{CO}_2$ 及其他温室效应气体对环境造成了严重的污染,近期中东部大部分地区的雾霾天数屡创新高;此外,煤炭超强度开采还导致突发性地质灾害频发。伴随工业化、城镇化发展对化石能源的刚性需求与常规化石能源短缺的矛盾日益加剧,供需严重失调。我国油气人均剩余可采储量仅为世界平均水平的6%,常规天然气新增产量仅能满足新增需求的30%,石油对外依存度从21世纪初的26%跃至2011年的57%,加之世界能源市场复杂多变,围绕能源资源的博弈日趋激烈,能源安全压力与日俱增。为此,大力发展非化石能源,培育新的能源供应增长极,特别是大规模风能的开发利用是大势所趋。

风能资源来源于太阳对地球的辐射,其总量十分可观。全球风能可开发资源量约为100亿千瓦,可发电量为20~50亿千瓦时;我国风能资源丰富,10米高度可开发资源量超32亿千瓦,截至2010年年底累计装机容量已达4182.7万千瓦,成为世界第一风电大国,预计2020年将达到2亿千瓦。

变速运行风力发电系统克服了定速运行系统风能利用率低、

风速跃变时机械应力大等不足,因此受到广泛重视,市场份额也不断增加。根据动力传动系统是否存在增速齿轮箱,风电机组可分为非直驱式风电系统(以双馈异步风电机为代表)和直驱式风电系统。

根据有无换向电刷,双馈风力发电系统分为有刷和无刷风电系统两大类。有刷风力发电机转子侧由集电环和电刷经功率变换器接入交流电网,通过控制转子电流频率即可实现变速(70% ~ 130% 同步转速)恒频发电运行;无刷风力发电机控制绕组经功率变换器接入交流电网,通过调节控制绕组电流频率达到与有刷风力发电机相同的控制目标,而且无刷结构有助于提升系统可靠性,更适用于恶劣工况运行。双馈风力发电系统的拓扑结构如图 1-1 所示,双向变换器容量不到电机额定容量的 30%,大大降低了变换器的损耗和造价,但多级增速齿轮箱在噪音控制、故障维护、系统效率等方面存在诸多问题。

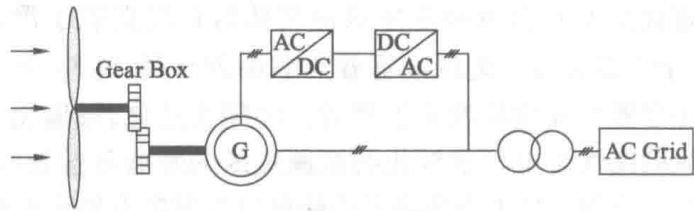


图 1-1 双馈变速风力发电系统

如图 1-2 所示的直驱式变速风力发电系统通过背靠背的全功率变换器与交流电网连接,因此变换器部分的成本与功率损耗较高,有益之处在于风力机与发电机采用无传动机构的直接耦合,由此省去了增速齿轮箱,可靠性占优。另外需要指出的是,相比交流配电网,直流配电网以其建设费用低、传输损耗小、供电可靠性高、电磁辐射少等优点,呈迅速发展态势。而直驱式风电机产生的交流电经 AC/DC 和 DC/AC 两级变换并入交流电网,用户还需经 AC/DC 变换给蓄电池、计算机、LED 照明、变频驱动电机等设备供电,如将交流配电架构变为直流配电架构,转换损耗及为其付出的冷却损耗得以大幅削减。随着采用直流供电方式的终端设备数量

不断增加,以及直流配电架构的优化与推广,直驱式无刷直流风力发电机的应用前景更为广阔。

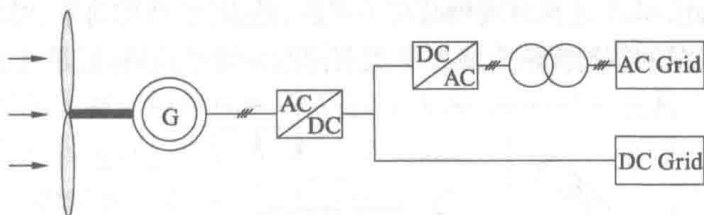


图 1-2 直驱式变速风力发电系统

### 1.1.2 航空电源领域

液压、气动、电气和机械系统共同构成了现代飞机的混合式二次能源系统,为了提升系统可靠性,减轻飞机重量,降低维护和保障费用,缩短制造周期,以单独电传机构取代液压、气动和机械系统为特征的全电飞机(All Electric Aircraft, AEA)概念得到了业界广泛认可。AEA 的研制涉及相互关联的多个子系统,很难实现一步到位,因此采用分阶段逐项替代,由减少到完全取消液压、气动系统入手,再进一步去除齿轮和润滑系统,出现了多电飞机(More Electric Aircraft, MEA)的概念。

MEA 到 AEA 概念的实施意味着用电设备及负荷的增加(除冰、起落架、刹车系统、数字控制与通信网络等),对航空电源(包括发电机)容量的要求越来越高。从降低输电电缆重量出发,更高电压等级的 115 V 交流配电及 270 V 高压直流配电系统将取代传统的低压 28 V 直流系统。具有 MEA 技术应用里程碑意义的 B787 型飞机采用变速变频电源系统(供电总容量接近 1.5 MVA),其中包括为动力系统提供电力的 4 台 250 kVA 发电机及为控制系统和机舱设施提供电力的 2 台 225 kVA 发电机。

到目前为止,旋转整流器式三级无刷直流发电系统仍是变频交流电源(如空客 A380 和波音 B787)和高压直流电源(如 F-22 战斗机)的主选。如图 1-3 所示,这种电机借助转子上的三相旋转式整流器为主发电机提供直流励磁,虽然实现了整机无刷化的要求,但增加了转子结构的复杂程度,影响了电源系统的可靠性,而

且不宜高温、高速运行。有文献显示,曾有一架才运行 14 天的 B787 因某台发电机意外失效而紧急迫降。

因此,AEA 进程对发展高功率密度、低损耗、结构简单、可维护性强、耐高温的新型无刷直流发电机及控制系统是机遇,更是挑战。

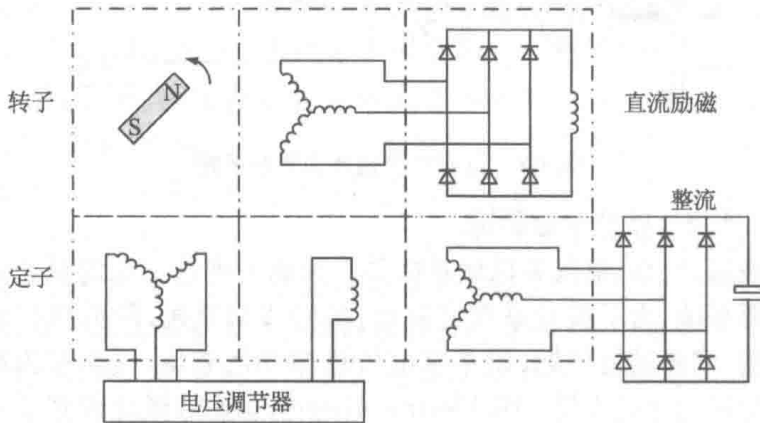


图 1-3 旋转整流器式三级无刷直流发电系统

1. 1. 3 车用电源领域

自 20 世纪 50 年代将汽车电源由 6 V 提升至 12 V, 已历经 60 多年。近年来,随着可加热风窗玻璃、座椅加热器、防抱死制动装置、自动变速器、主动悬架等设备的广泛应用,车载电子设备以 5% ~ 8% 的比例逐年递增。如沿用目前的 14 V 电源系统,工作电流将高达 200 ~ 300 A, 这会使整车线束的重量及成本大幅增加。早在 20 世纪 90 年代,以欧盟 Forum Bordnetz( 旧称 SICAN forum) 和美国 MIT Consortium 为代表的两大机构就提出在人体安全电压范围内将汽车电源系统提升至 42 V, 此举得到了国际汽车业界的一致认可。中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局与中国国家标准化管理委员会针对 42 V 供电电压的电气和电子系统及组件,分别颁布了 GB/T ISO 21848—2005 ( 征求意见稿) 和 GB/T 28045—2011, 由此规定了单个或多个电压系统的试验和要求。

毋庸置疑,采用更高电压等级的电气系统有助于提升车辆电气潜力,促进汽车电气电子产品升级换代,但传统车载电子设备均

是基于 14 V 电源系统开发的,且在可靠性与成本控制方面趋于成熟,如直接推行完全的 42 V 电气系统而废弃原有的生产设备,势必对整车生产厂家,尤其是零配件供应商带来巨大的冲击,因此由 42 V/14 V 双电压电气系统逐渐过渡至 42 V 单电压方案是一种比较明智的选择。根据发电机及蓄电池电压的差异,通常有以下几种方案可供选择。

### 1.3.1.1 双无刷直流发电机系统

如图 1-4 所示的双无刷直流发电电气系统,在保留传统的 14 V 无刷直流发电机的基础上,新增一台为大功率车载电器(加热装置、发电机控制单元、主动悬架等)单独供电的 42 V 无刷直流发电机。

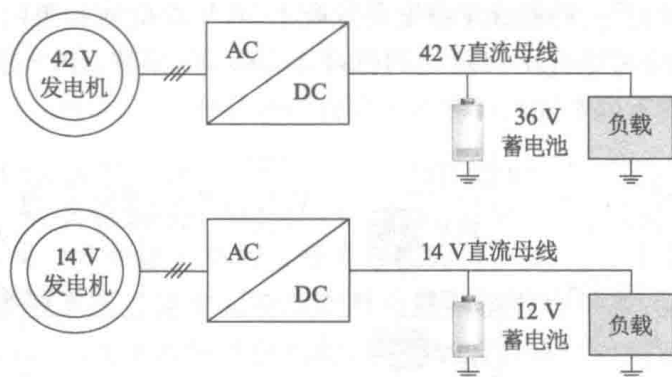


图 1-4 双无刷直流发电电气系统方案图

该方案采用了两套相互独立的高、低压电气系统,相对既有 14 V 电气系统的影响较小,且易于改装实现;但两台交流发电机方案在成本控制及功率密度等方面处于劣势,同时给机舱布局增加了难度,使其实际应用价值大打折扣。

### 1.3.1.2 无刷直流发电机系统

为克服双无刷直流发电系统的不足,如图 1-5a 所示的单发电机、双电枢绕组方案采用两套相互独立的 14 V 和 42 V 电枢绕组,并配置两套不控整流装置以提供不同电压等级的直流母线。该方案无须额外的 DC/DC 变换器,但双绕组结构给电机设计与制造增

加了难度,另一方面,由于共用一套电励磁控制绕组,很难保证 14 V 和 42 V 直流侧在全功率范围内同时具备较高的电压控制精度。

图 1-5b 给出了单电枢绕组配双整流器的实现方案,通过调节励磁电流确保 42 V 直流母线电压恒定,并采用相控整流或 PWM 整流技术得到 14 V 直流电压。该方案相对于定子双绕组结构电机的复杂程度有所降低,但 14 V 和 42 V 直流母线存在相互影响,可靠性相应降低。

图 1-5c 给出的单电枢绕组配 DC/DC 变换器结构具有较强的灵活性,但需额外增加 DC/DC 变换器。一种方案是同时配备 12 V 和 36 V 蓄电池,通过双向 DC/DC 变换器构成冗余电源,提升系统的可靠性;另一种低成本方案是仅配备 36 V 蓄电池和单向 DC/DC 变换器,也可结合小容量化的低成本 DC/DC 模块,便于分布式布置以适应不同空间设计和电子器件的散热要求。

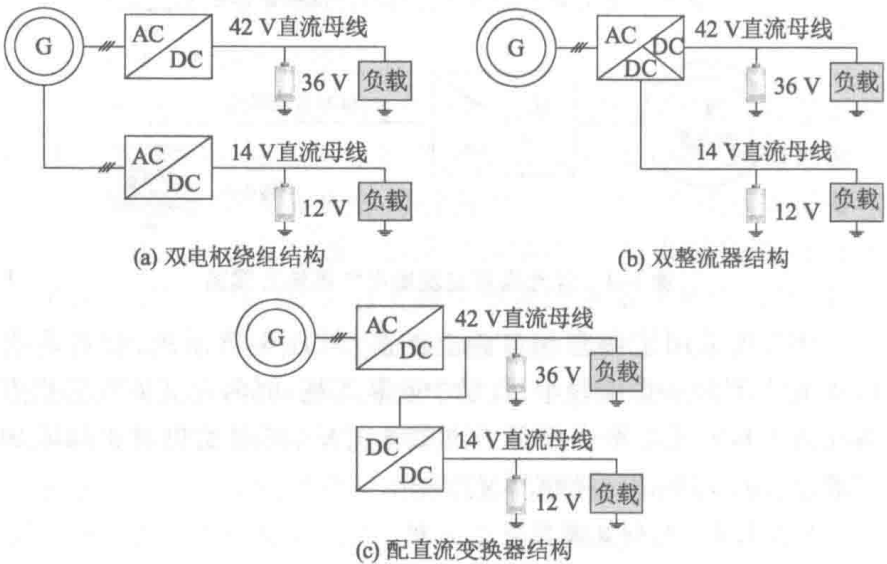


图 1-5 单发电机系统方案

上述几种方案各有利弊,但通过提高输出电压来增大汽车配电功率是必然趋势。传统的爪极发电机虽然具有结构简单、价格

低廉等优势,但在输出功率及效率方面均不能满足未来汽车电源系统的要求,因此 42 V 电气系统的实施将给无刷直流发电机的发展带来新的契机。

## 1.2 无刷直流发电机的主要种类及研究现状

### 1.2.1 异步电机

无刷双馈异步发电机定子侧设置了极数不同的功率绕组和控制绕组,转子的极数一般为定子两套绕组极数之和,对应的频率关系为

$$60(f_p + f_c) = n_r(p_p + p_c) \quad (1-1)$$

式中,  $n_r$  为转子转速;  $p_p$  和  $p_c$  分别为功率绕组和控制绕组的极对数,通常要求满足  $p_p \neq p_c$  且  $|p_p| \geq |p_c|$ ;  $f_p$  和  $f_c$  分别为功率绕组和控制绕组的频率。

功率绕组和控制绕组同相序(超同步运行)时  $f_c$  取正,功率绕组和控制绕组逆相序(亚同步运行)时  $f_c$  取负。当转子转速  $n_r$  发生变化时,只需调整  $f_c$  即可实现变速恒频运行,较适合于多级水力和风力发电系统。笼型无刷双馈异步电机谐波含量高,导致铁损及谐波电流的集肤效应产生的附加铜损上升,效率一般难以超过 70%。如采用绕线式转子结构,虽然可有效降低谐波含量,但加剧了电机的复杂性及制造成本,并且电机强度及使用寿命也会受到影响。因此,直流配电系统的异步发电机多选用鼠笼型异步电机和定子双绕组异步电机。

将双绕组同步发电机思想应用于异步发电机,海军工程大学提出了双绕组感应发电机系统的理论和方案。如图 1-6 所示,该电机定子上放置极数相同的功率绕组和控制绕组,功率绕组输出端连接自励电容及整流性负载,控制绕组连接三相 PWM 励磁调节器。空载运行时,依靠自励电容建立额定电压;当转速与负载变化时,通过调节励磁绕组注入的无功电流大小来维持直流电压恒定。两套结构对称的绕组仅通过磁场耦合,因此逆变器产生的谐波对