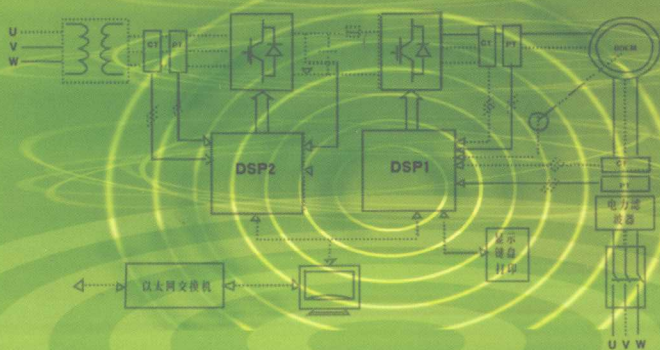


无刷双馈电机的电磁 分析与设计应用

邓先明 著



无刷双馈电机的电磁分析与设计应用

邓先明 著



机械工业出版社

无刷双馈电机 (BDFM) 作为一种新型交流调速电机, 具有无电刷、结构简单坚固、变频器容量小、功率因数可控制、运行可靠等优点, 是传统交、直流电机调速系统的强有力竞争者, 在大型水泵、风机调速和风力发电领域具有广阔的应用前景。

本书系统阐述了 BDFM 的工作原理和电磁关系、电磁设计原理和方法、有限元分析方法、工作特性、隐极转子结构的设计理论和实现方法等, 推导出完整的 BDFM 稳态等效电路和动态数学模型, 并介绍了 BDFM 的控制策略和应用实例。本书对工作特性给出了理论计算实例和实验验证, 还给出了利用 ANSYS 软件分析 BDFM 磁场的实例, 具有较高的实用性。

本书可供从事电机设计和应用的工程技术人员、研究人员参考使用, 亦可供高等院校相关专业的教师和学生作为教科书或教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

无刷双馈电机的电磁分析与设计应用/邓先明著. —北京: 机械工业出版社, 2008. 12

ISBN 978-7-111-25239-9

I. 无… II. 邓… III. 无刷电机 - 电磁理论 IV. TM345

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 153946 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: 吉玲 责任编辑: 吉玲 刘星宁

版式设计: 张世琴 责任校对: 李秋荣

封面设计: 赵颖哲 责任印制: 邓博

北京京丰印刷厂印刷

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

148mm × 210mm · 5.75 印张 · 167 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-25239-9

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

前 言

无刷双馈电机 (Brushless Doubly-Fed Machine, BDFM) 作为近年发展起来的一种新型交流调速电机, 它由两套相互独立的定子绕组 (功率绕组和控制绕组) 和特殊结构的转子组成, 利用可逆变频器调节控制绕组的电源频率实现对 BDFM 的转速控制。BDFM 具有无电刷、结构简单坚固、变频器容量小、功率因数可控制、运行可靠等优点, 是传统交、直流电机调速系统的强有力竞争者, 在大型水泵、风机调速和风力发电领域具有广阔的应用前景。

BDFM 的电磁关系和结构较复杂, 其设计过程和性能分析与传统交流电机差异较大, 工程设计人员往往面临无从下手的困难。在电机控制方面, 如果对电机的电磁关系、等效电路和工作特性缺乏充分了解, 就难以实现对电机的优化控制。要促使 BDFM 的推广应用, 必须提供正确的理论指导和有效的设计方法, 这是本书的最终目的。本书系统阐述了 BDFM 的工作原理和电磁关系、电磁设计原理和方法、有限元分析方法、工作特性、隐极转子结构的设计理论和实现方法等, 详细推导出完整的 BDFM 稳态等效电路和动态数学模型, 并介绍了 BDFM 的控制策略和应用实例。全书以作者多年的研究成果为基础, 并引用了国内外的一些研究结论。在阐述过程中, 注意理论与实际相结合, 对电机工作特性给出了理论计算实例和实验验证, 还给出了利用 ANSYS 软件分析 BDFM 磁场的实例, 使读者在阅读完相关内容后, 能顺利地完成了对 BDFM 的有限元分析, 具有较高的实用性。

全书共分 9 章。第 1 章概述 BDFM 的发展历史和研究现状。第 2 章详细分析了 BDFM 的工作原理和电磁关系, 讨论了 BDFM 的电磁设计方法。第 3 章利用 ANSYS 软件, 对 4 种转子结构的 BDFM 磁场进行了有限元分析计算。第 4 章讨论了新结构 BDFM 的设计原理和方法。第 5 章推导出完整的 BDFM 稳态等效电路, 并分析其稳态工作特性。第 6 章讨论了 BDFM 的动态数学模型。第 7 章讨论了 BDFM 的控

制策略。第8章讨论了BDFM样机的特性实验。第9章给出了BDFM的工程应用实例。

本书叙述力求准确无误、深入浅出、数据可靠,可供从事电机设计和应用的工程技术人员、研究人员参考使用,亦可供高等院校相关专业的教师和学生作为教科书或教学参考书。

本书编写过程中,得到上海交通大学姜建国教授,中国矿业大学伍小杰教授、谭国俊教授、马小平教授的悉心指导,在此表示深深的谢意。本书引用了国内外的一些研究成果,在此也对这些文献的作者一并表示感谢。

本书的出版得到了江苏省徐州市科技发展基金和中国矿业大学电力电子与电力传动国家重点学科建设经费的资助。

由于作者水平有限,本书难免有不足和疏漏之处,恳请广大读者不吝指正。

作者

主要符号表

一、参数和物理量文字符号

A	矢量磁位	I_{1c}	定子控制绕组电流
A_z	A 在 Z 轴方向的分量	I_{1p}	定子功率绕组电流
B	磁感应强度	I_d	I_{1p} 的 d 轴分量
B_δ	气隙磁通密度	I_q	I_{1p} 的 q 轴分量
D	电通密度	$I_{rc\alpha}$	控制绕组异步制动转子电流
D_1	气隙的平均直径	i	相电流瞬时值
D_s	电机定子外径	J	外加电流密度
E	电场强度	J_z	J 在 Z 轴方向的分量
$E_{1\sigma}$	定子绕组漏电动势	k_{a1}	a 相绕组的基波绕组系数
E_1	定子绕组电动势	k_{b1}	b 相绕组的基波绕组系数
E_r	转子绕组电动势	k_{sp1}	功率绕组基波绕组系数
$E_{rc\alpha}$	控制绕组异步制动时的转子电动势	k_{sc1}	控制绕组基波绕组系数
F_r	转子磁动势	k_{wrlp}	转子基波绕组系数
F_1	基波磁动势	k_{cp}	电动势常数
F_δ	气隙基波磁动势	k_{rp1}	转子功率绕组基波绕组系数
F_{1p}	功率绕组基波磁动势幅值	k_{rc1}	转子控制绕组基波绕组系数
F_{1c}	控制绕组基波磁动势幅值	L_{ab}	a 相和 b 相之间的主电感
F_m	基波磁动势幅值	L_{ms}	定子主电感
f	频率, 磁动势瞬时值	L_{mr}	转子主电感
f_c	控制绕组电压频率	L_r	转子自感
f_r	转子电动势频率	L_{sr}	定、转子互感
f_p	功率绕组电压频率	L_σ	漏电感
f_1	基波磁动势瞬时值	N	转子深槽数量
g	气隙的平均长度	N_{1p}	定子绕组匝数
H	磁场强度	n_1	磁动势旋转速度
I_r	转子电流	n_r	转子旋转速度
		n_{rp}	转子磁动势相对转子的速度

n'_p	转子磁动势相对定子的速度	x_{lc}	定子控制绕组漏电抗
P_{1p}	功率电机的输入功率	x_r	转子绕组漏电抗
P_{mec}	机械功率	x_m	励磁电抗
P_{mecb}	控制绕组异步制动时的机械功率	γ_{1p}	定子功率绕组节距
P_{sp}	功率电机转差功率	γ_{lc}	定子控制绕组节距
P_{sc}	控制电机转差功率	Z	槽数,复阻抗
P_{em}	电磁功率	Z_1	定子槽数
P_s	转差功率	Z_2	转子槽数
P_2	电机输出功率	Z_r	转子复阻抗
P_1	电机输入功率	λ_δ	气隙磁导波
ΣP	总损耗	λ_0	平均气隙磁导
p	极对数	λ_k	k 次谐波气隙磁导
p_{cu}	转子铜损	ω	电角速度,角频率
Q_2	转子导体数	ω_1	定子磁动势旋转角速度
r_s	定子电阻	ω_r	转子旋转角速度
r_r	转子电阻	ω_s	转差频率
r_m	励磁电阻	θ	功角,电角度
s_{cr}	控制电机转差率	φ	功率因数
s	转差率	Φ_m	主磁通幅值
T_0	空载转矩	ψ	磁链
T_{em}	电磁转矩	μ	磁导率
T_2	输出转矩	μ_0	空气磁导率
T_L	负载转矩	η	效率
U_{1p}	功率绕组电压	τ	极距
U_{lc}	控制绕组电压	α	空间电角度
u	电压瞬时值	β_1	绕组长距系数
x_{1p}	定子功率绕组漏电抗	β_2	绕组短距系数
		γ	谐波次数

二、常见下角标

p	与功率绕组对应的量	2	二次侧,2#绕组
c	与控制绕组对应的量	i	第 i 个导条
r	与转子对应的量	u, v, w	对称三相电路中的一相
s	与定子对应的量	b	制动性质的参量
l	一次侧,1#绕组		

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 现代交流调速技术介绍	1
1.2 无刷双馈电机的发展历史	7
1.3 无刷双馈电机的研究现状	9
第 2 章 无刷双馈电机的工作原理与电磁设计	14
2.1 引言	14
2.2 无刷双馈电机的工作原理分析	16
2.2.1 无刷双馈电机的磁动势分析	16
2.2.2 无刷双馈电机的转速分析	22
2.2.3 无刷双馈电机的功率分析	25
2.3 无刷双馈电机的电磁设计	35
2.3.1 定子绕组极对数的设计	36
2.3.2 定子绕组设计	37
2.3.3 转子设计	40
2.4 小结	42
第 3 章 无刷双馈电机磁场的有限元分析	44
3.1 引言	44
3.2 有限元法的基本原理	44
3.3 无刷双馈电机的有限元法分析模型及条件	46
3.3.1 无刷双馈电机的模型	46
3.3.2 无刷双馈电机有限元分析的假设条件	47

3.3.3 无刷双馈电机有限元分析的基本方程	48
3.4 无刷双馈电机的 ANSYS 有限元法分析	49
3.4.1 建立有限元法分析模型	50
3.4.2 定义属性	52
3.4.3 有限元网格划分	54
3.4.4 设置边界条件并求解	54
3.4.5 无刷双馈电机的磁力线	56
3.4.6 无刷双馈电机的磁通密度	58
3.4.7 无刷双馈电机的气隙磁通密度波分析	60
3.5 小结	66
第 4 章 一种新转子结构无刷双馈电机的设计	67
4.1 引言	67
4.2 隐极笼型转子结构的设计	67
4.3 隐极笼型转子无刷双馈电机的气隙磁场分析	68
4.4 隐极笼型转子无刷双馈电机的有限元分析	72
4.4.1 建立有限元法分析模型	73
4.4.2 定义属性	73
4.4.3 有限元网格划分	74
4.4.4 设置边界条件并求解	74
4.4.5 隐极笼型转子无刷双馈电机的磁力线和磁通密度	75
4.4.6 隐极笼型转子无刷双馈电机的气隙磁通密度波分析	76
4.5 小结	78
第 5 章 无刷双馈电机的稳态数学模型与特性分析	80
5.1 引言	80
5.2 无刷双馈电机理想转换的等效电路	80
5.2.1 理想转换的电磁关系	80
5.2.2 基于新频率折算法的等效电路	84
5.3 无刷双馈电机非理想转换的等效电路	87
5.4 无刷双馈电机稳态特性分析	90

5.4.1	无刷双馈电机的可逆过程分析	90
5.4.2	无刷双馈电机的电磁功率分析	91
5.4.3	无刷双馈电机的功率因数分析	94
5.4.4	无刷双馈电机的稳定性分析	97
5.4.5	无刷双馈电机的单馈异步特性分析	99
5.5	小结	101
第6章 无刷双馈电机的动态数学模型		103
6.1	引言	103
6.2	绕组电感	104
6.2.1	定子绕组自感	105
6.2.2	定子绕组互感	106
6.2.3	转子绕组电感	106
6.2.4	定子和转子绕组互感	107
6.3	坐标变换理论	108
6.4	三相静止坐标系中的数学模型	112
6.5	二相旋转坐标系中的数学模型	116
6.5.1	二相任意速度坐标系中的数学模型	117
6.5.2	二相转子速度坐标系中的数学模型	119
6.5.3	双同步坐标系中的数学模型	120
6.6	无刷双馈电机的动态仿真	121
6.6.1	单馈异步动态特性仿真	122
6.6.2	双馈同步动态特性仿真	126
6.6.3	双馈亚同步动态特性仿真	129
6.6.4	双馈超同步动态特性仿真	130
6.6.5	无刷双馈电机转速特性仿真	132
6.7	小结	134
第7章 无刷双馈电机的控制策略		136
7.1	引言	136
7.2	无刷双馈电机的标量控制	136

7.3	无刷双馈电机的直接转矩控制	138
7.4	无刷双馈电机的转子磁场定向控制	141
7.5	小结	144
第8章	无刷双馈电机样机实验分析	145
8.1	无刷双馈电机样机实验系统	145
8.2	无刷双馈电机样机参数测定	147
8.3	无刷双馈电机样机起动控制实验	150
8.4	无刷双馈电机样机转速控制实验	152
8.5	无刷双馈电机样机功率因数调节实验	153
8.6	无刷双馈电机样机稳定区间测定	157
8.7	小结	158
第9章	无刷双馈电机的应用实例	160
9.1	无刷双馈电机在水泵中的应用	160
9.1.1	无刷双馈电机与异步电机调速系统的对比	160
9.1.2	无刷双馈电机在水泵类负载中的应用现状	162
9.2	无刷双馈电机在风力发电中的应用	163
9.2.1	基于无刷双馈电机的变速恒频风力发电系统组成	164
9.2.2	无刷双馈电机在风力发电中的应用现状	168
参考文献	169

第 1 章 绪 论

1.1 现代交流调速技术介绍

随着电力电子技术和计算机控制技术的发展，交流电动机调速系统已越来越多地被应用到高压大功率和有高性能要求的场合。交流电动机调速系统具有调速范围宽、调速精度高、稳定性高、动态响应快和能够四象限运行等优点，在煤炭、石油、化工、冶金等工业领域得到了广泛的应用。目前交流变频调速技术正在向高性能、高精度、大容量、数字化、集成化和智能化方向发展。现代交流调速系统中应用的交流电动机主要有同步电动机、异步电动机和开关磁阻电动机等几类。

1. 同步电动机变频调速系统

同步电动机的结构如图 1-1 所示。其定子中放置三相对称交流绕组；转子中放置集中的直流励磁绕组，它通过集电环和电刷与外加直流励磁电源连接。当转子绕组加直流励磁电流后，在转子中就产生一个恒定的直流磁场。当定子三相对称交流绕组加三相对称交流电压后，在电动机磁路中产生一个圆形旋转磁场，该旋转磁场的磁极 (N_1) 与转子磁场的异性磁极 (S_2) 相互吸引产生磁拉力，形成电磁转矩。转子在该电磁转矩的作用下会随定子磁场同步旋转，其转速为

$$n = \frac{60f}{p} \quad (1-1)$$

式中 f ——定子电源频率 (Hz)；

p ——极对数。

可见同步电动机的转速始终与磁场的速度相等，与电源频率成正比，因此通过调节电源频率就可以改变电动机的转速。同步电动机变频调速系统分为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，给同步电动机供电的变频器的输出频

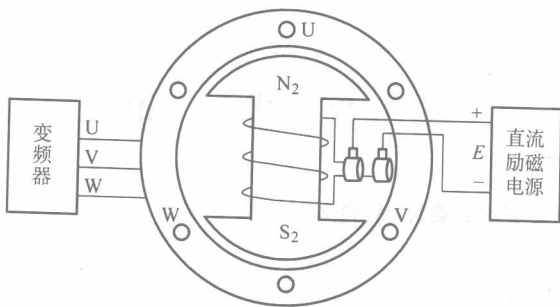


图 1-1 同步电动机调速系统

率是由转速给定信号决定，即由式 (1-1) 的关系给定。这种调速系统一般采用开环控制，它的系统结构简单，但是存在转子振荡和失步等问题。

自控式变频调速系统是一个闭环系统，它在同步电动机转轴上装了转子磁极位置传感器，通过其输出信号来控制变频器的输出频率与电动机的实际转速同步。这样就可以消除失步问题。该变频调速系统多用于拖动轧钢机、造纸机和数控机床等精度要求高、动态和稳态性能好的场合。

自控式同步电动机变频调速系统有以下 4 种基本类型：

(1) 交直交电流型自控式同步电动机变频调速系统

系统由同步电动机、转子磁极位置传感器和变频器组成。变频器的主电路由整流桥、逆变桥和平波电感组成。整流桥将交流电转换成可控的直流电，然后再由逆变桥变为频率可控的交流电，供给同步电动机电枢绕组，以实现变频调速的功能。

(2) 交直交电压型自控式同步电动机变频调速系统

变频器的主电路由整流桥、逆变桥、滤波电感和电容组成。整流桥将交流电转换成恒定的直流电压，采用脉宽调制技术，然后由逆变器产生幅值可调、波形接近正弦的电压，供给同步电动机电枢绕组，以实现变频调速的功能。

(3) 交交电流型自控式同步电动机变频调速系统

变频器的主电路中每 3 个晶闸管组成一组，用来代替交直交系统

中逆变器的一个晶闸管，同时它又对输入的交流电进行整流，实现了电能的一次变换。其工作原理与交直交方案基本相同。低速时利用电源电压换相，高速时采用负载反电动势换相，输出频率可以高于 50Hz。

(4) 交交电压型自控式同步电动机变频调速系统

变频器的主电路有 3 个两组反向并联连接的变流器组，可提供三相正弦电压。电动机电磁脉动较小。变频器的输出频率在 0.5 倍的电源频率以下。

同步电动机变频调速系统与直流调速系统相比，其结构简单、坚固、耐用，维护工作量小。结合矢量控制技术的自控式系统的精度高，动态和稳态性能好。但存在以下缺点：

1) 由于同步电动机的集电环与电刷需要经常维护，降低了电动机的可靠性，同时滑动接触易产生火花，限制了它的应用范围。

2) 同步电动机（永磁式除外）需要在转子侧加一套励磁装置，与笼型异步电动机相比，增加了维护工作量。

3) 变频器的容量大，需要与电动机的容量相匹配。因此，对于大电动机而言，变频器的制造成本和维护成本都很高。

2. 异步电动机变频调速系统

异步电动机分为绕线转子和笼型转子两大类，如图 1-2 所示，其定子中放置三相对称交流绕组。绕线转子中也放置与定子中类似的三相对称交流绕组，它通过集电环和电刷与外电路连接；笼型转子中放置并联短路的导条。当定子三相对称交流绕组加三相对称交流电压

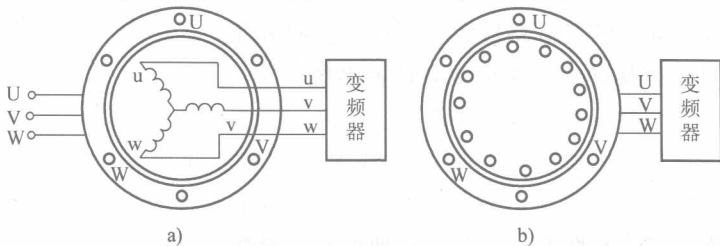


图 1-2 异步电动机变频调速系统

a) 绕线转子 b) 笼型转子

后,在电动机磁路中产生一个圆形旋转气隙磁场。转子导体就切割该磁场感应出电动势,由于转子电路是短路闭合回路,会产生转子电流,该电流与气隙磁场作用产生拖动电磁转矩,转子就在电磁转矩的作用下旋转。电动机的转速一定要低于磁场同步转速,才能在转子中感应出电动势,产生出电流形成电磁转矩。异步电动机的转速为

$$n = (1 - s) \frac{60f}{p} \quad (1-2)$$

可见改变电源频率就可以调节电动机的转速。异步电动机的变频调速系统有以下几类:

(1) 转差频率控制的变频调速系统

该系统是一种基于速度、电流双闭环的变频控制系统。系统通过调节转差率来控制电磁转矩,从而达到调节电动机转速的目的。因为在气隙磁通不变时,电磁转矩的大小与转差率成正比,因此通过控制气隙磁通不变,就可以仿照直流电动机的控制方法,即控制转差率来直接控制电磁转矩。为了使气隙磁通不变,需要控制定子电流按照特定的电流-转差率曲线来变化。

(2) 磁场定向矢量控制的变频调速系统

矢量控制是由于其被控制量——磁动势是空间矢量而得名的。在转子磁场定向矢量控制中,通过坐标变换和磁场位置检测,巧妙地实现了异步电动机磁通和转矩的解耦和闭环控制。此时参考坐标系放在同步旋转磁场上,并使d轴和转子磁场方向重合,于是转子磁场q轴分量为零。电磁转矩方程得到简化,即在转子磁通恒定的情况下,电磁转矩和定子电流q轴分量成正比,因此异步电动机的机械特性和他励直流电动机的机械特性完全一样,控制方便。

(3) 直接转矩控制的变频调速系统

直接转矩控制是直接在定子坐标系上计算磁通和转矩的大小,并通过磁通和转矩的直接跟踪实现PWM控制和系统的高动态性能。从转矩调控的角度看,只关心转矩的大小,磁通本身的小范围误差并不影响转矩的控制性能。因此,这种控制对参数变化不敏感。此外,由于电压开关矢量的优化,降低了逆变器的开关频率和开关损耗。

(4) 绕线转子双馈变频调速系统

双馈电动机是绕线转子异步电动机的定子绕组和转子绕组都被加上交流电源形成的。其中，定子绕组的电源为固定频率的工业电源；而转子绕组的电源由变频器提供。如果改变转子外接电源的频率、幅值和相位，就可以调节电动机的转速和定子侧的无功功率，这种双馈调速的异步电动机不但可以在亚同步转速区运行，而且可以在超同步转速区运行。

异步电动机变频调速系统与同步电动机变频调速系统相似，其结构简单、坚固、耐用，维护工作量小。笼型异步电动机变频调速系统的结构更加简单可靠。结合矢量控制的变频调速系统具有精度高、动态和稳态性能好的优点，但是它也存在以下一些缺点：

1) 异步电动机需要从定子侧励磁，其功率因数较低，和相同容量的同步电动机相比，所用变频装置容量大。

2) 笼型异步电动机的变频器容量大，需要与电动机的容量匹配。因此，对于大电动机而言，变频器的制造成本和维护成本都很高。

3) 绕线转子双馈电动机可以运行在双馈状态下，从而减小变频器的容量，但是由于电刷的存在，使其变频调速系统的可靠性变差，需经常维护，导致其无法在环境恶劣的场合下应用。

3. 开关磁阻电动机变频调速系统

开关磁阻电动机驱动系统是近年快速发展的一种新型交流调速系统。开关磁阻电动机的结构如图 1-3 所示。定子和转子都是由硅钢片叠成的凸极结构，其中转子极上既无励磁绕组也没有永磁体。定子极上安放有集中绕组（图 1-3 中只画了 U 相绕组）与功率变换器连接。开关磁阻电动机驱动系统由开关磁阻电动机、功率变换器、控制器和传感器等部分组成。开关磁阻电动机的电磁转矩具有磁阻性质，其作用原理是磁阻最小原理，即定子绕组电流产生的磁通总是沿磁阻最小的路径，因磁力线扭曲而产生切向磁拉力，形成拖动性质的磁阻转矩。为了得到方向不变的拖动磁阻转矩，需要依靠转子位置检测信号来控制功率变换器，决定定子绕组通电的时刻和绕组的导通顺序。

开关磁阻电动机由于转子上没有绕组，定子线圈的端部又很短，故其结构简单、可靠，而且线圈的发热量小且容易散热。它的转矩是

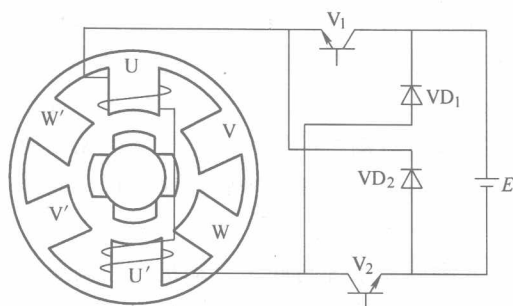


图 1-3 开关磁阻电动机结构

靠定子和转子的凸极效应产生的，与绕组中所通电流的极性无关，因此每相绕组中可通入单方向的直流电流，无须交变电流。这样不但可使控制每相电流的功率开关器件数量减少一半，而且可以避免一般电压型逆变器中最危险的上、下桥臂器件直通的故障，不但显著降低控制装置的成本，而且大大提高了系统的安全可靠性。

开关磁阻电动机的主要缺点有：

- 1) 它产生的电磁转矩脉动较大，振动与噪声较严重。
- 2) 在位置传感器等出现故障时，不能开环应急运行。

综上所述，虽然目前交流变频技术在不断地改进，但是也存在不少缺陷。如何使交流电动机无刷化并且用小容量变频器控制大电动机，使交流传动系统具有高效率、高功率因数、高可靠性、低成本已成为电机制造工业和交流传动系统待解决的一项技术难题。

为了克服以上变频调速系统的缺点，BDFM 变频调速系统是较理想的选择。BDFM 是近年来发展起来的一种新型电机，它作为变频电机有以下优点：①由于结构的特殊设计，没有电刷和集电环等装置，增加了运行的可靠性，降低了维护成本。②变频电源只需给控制绕组供电，因此其容量远小于电动机的额定功率，这一方面降低了变频调速系统的成本，另一方面减少了对电网的谐波污染。③功率因数可调。④作为电动机时调速范围宽、控制简单；当变频设备出现故障时，可以断开控制绕组电源，仅由功率绕组电源提供电能，进行异步运行，从而提高系统的安全性和可靠性。