



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



磁场调制式无刷双馈交流电机

王凤翔 张凤阁 著

吉林大学出版社

· 长春 ·

前 言

磁场调制式无刷双馈交流电机是一种无刷结构的新型交流电机，其定子具有极数不同的两套绕组，称为主绕组与副绕组（或工作绕组与控制绕组），其转子可采用笼型或磁阻转子结构。通过转子对定子两套绕组电流产生磁场的调制作用，实现机电能量转换。该电机在电动机运行方式下，既可异步运行，又可同步运行，并可通过控制副绕组的电流实现低于和高于同步速的双馈调速运行。在发电机运行方式下，则可通过副绕组的交流励磁控制实现变速恒频，即在电机转速变化的情况下使主绕组输出交流电的频率恒定。由于副绕组所需要的控制功率较小和控制系统成本较低，该种电机在大中型交流电机调速系统和变速恒频风力和水力发电系统中具有良好的推广应用前景。

本书作者从 1987 年开始对该种新型电机进行研究，先后得到沈阳市和辽宁省科技基金的资助，并于 1997 年获得国家自然科学基金的资助。通过多年的理论和试验研究，奠定了磁场调制式无刷双馈电机的理论与应用技术基础。该项研究成果被国家自然科学基金委员会选为中华人民共和国成立 50 周年优秀成果应用推广项目，所研制的样机已出口英国和韩国。编写本书的目的是想把作者多年来的研究成果、经验和体会整理出来，介绍给大家，以利于磁场调制式无刷双馈电机的研究与推广应用。

本书内容分为六章。第一章首先介绍无刷双馈电机的结构

特点与运行方式。第二章阐述无刷双馈电机的运行原理与磁场调制机理,推导具有不同转子结构无刷双馈电机的统一等效电路与能量流通关系。第三章介绍无刷双馈电机的数学模型与特性仿真方法,其中包括以 MATLAB 为平台的数字仿真软件的开发技术。第四章介绍无刷双馈电机的参数计算方法,其中包括绕组电感计算的磁场分析法与绕组函数法。第五章论述无刷双馈电机的设计与性能测试方法。第六章介绍无刷双馈电机的控制和应用技术。为了便于读者尽快掌握参数计算方法和进行特性仿真的需要,附录中给出了具有轴向叠片磁阻转子和笼型转子两种典型转子结构无刷双馈电机的参数计算程序。

本书融入了作者以及沈阳工业大学电气控制技术研究所多年的研究成果,其中包括多名博士研究生和硕士研究生的研究工作,特别是林成武教授和王正副教授对于双馈电机控制技术的研究成果。书中还包括了作者与美国俄亥俄州立大学(The Ohio State University) Longya Xu 教授的合作研究成果。对于他们对本书的贡献,在此表示衷心的感谢。

清华大学电机系王祥珩教授(博士生导师)和浙江大学电气工程学院的贺益康教授(博士生导师)对书稿提出了宝贵意见,在此致以深切的谢意。

本书的出版得到国家自然科学基金委员会研究成果专著出版基金的资助,在此深表谢意。

由于作者水平所限,书中会有不少缺点和错误,恳请读者批评指正。请将宝贵意见寄至沈阳工业大学电气工程学院(邮政编码 110023)。

作 者
2003 年 6 月

目 录

第一章 无刷双馈电机的结构特点与运行方式	(1)
§ 1.1 无刷双馈电机的结构型式	(1)
1.1.1 双电机串级联接结构	(1)
1.1.2 双定子结构	(2)
1.1.3 单电机结构	(3)
§ 1.2 无刷双馈电机的定子绕组	(5)
1.2.1 双绕组结构	(5)
1.2.2 单绕组结构	(7)
§ 1.3 无刷双馈电机的转子结构	(10)
1.3.1 笼型转子	(10)
1.3.2 磁阻式转子	(12)
1.3.3 混合式转子	(13)
§ 1.4 无刷双馈电机的运行方式	(13)
1.4.1 自启动与异步运行方式	(14)
1.4.2 同步运行方式	(14)
1.4.3 双馈调速运行方式	(15)
1.4.4 发电机运行方式	(16)
第二章 无刷双馈电机的运行原理与磁场调制机理	(18)
§ 2.1 电机转子的磁耦合作用	(18)
2.1.1 不同转子结构无刷双馈电机的磁场分析	(18)
2.1.2 不同转子结构对电机磁场的影响	(20)

2.1.3	磁阻与笼型转子的等效关系	(23)
§ 2.2	无刷双馈电机的磁场调制机理	(24)
2.2.1	定子主副绕组电流产生的磁动势	(24)
2.2.2	磁阻转子的磁场调制作用	(25)
2.2.3	笼型转子的磁场调制作用	(28)
2.2.4	机电能量转换的实现	(29)
§ 2.3	无刷双馈电机等效电路与电磁转矩	(30)
2.3.1	磁阻转子无刷双馈电机的等效电路与 电磁转矩	(31)
2.3.2	笼型转子无刷双馈电机的等效电路与 电磁转矩	(33)
§ 2.4	无刷双馈电机中的能量流通关系	(41)
2.4.1	转子电流频率与转差率	(41)
2.4.2	功率、损耗与能量流通关系	(43)
第三章	无刷双馈电机的数学模型与特性仿真	(46)
§ 3.1	磁阻转子无刷双馈电机的数学模型	(46)
§ 3.2	笼型转子无刷双馈电机的数学模型	(48)
§ 3.3	电动运行方式下绕组电压和电流约束	(51)
3.3.1	自启动与异步运行方式	(51)
3.3.2	同步运行方式	(51)
3.3.3	副绕组由正弦波电源供电的双馈运行方式	(52)
3.3.4	副绕组由 SPWM 变频器馈电的双馈运行方式	(52)
§ 3.4	以 MATLAB 为平台的数字仿真软件	(55)
3.4.1	MATLAB 仿真语言和软件的特点	(55)
3.4.2	基于系统状态变量模型的仿真	(57)
§ 3.5	异步运行的特性仿真	(61)
3.5.1	无刷双馈电机的启动特性	(62)

3.5.2	无刷双馈电机的异步运行特性	(62)
3.5.3	异步运行方式的动态特性	(68)
§ 3.6	同步运行的特性仿真	(68)
3.6.1	同步运行特性	(68)
3.6.2	同步运行方式的动态特性	(70)
§ 3.7	双馈调速运行的特性仿真与运行性能	(71)
3.7.1	恒转矩负载调速特性	(72)
3.7.2	带风机、泵类负载时的调速特性	(77)
3.7.3	双馈运行方式的动态特性	(79)
§ 3.8	无刷双馈电动机的牵入特性	(81)
§ 3.9	无刷双馈电机的发电运行特性仿真	(83)
3.9.1	发电机数学模型	(83)
3.9.2	单机运行的特性仿真	(84)
3.9.3	并网运行的特性仿真	(85)
第四章	无刷双馈电机的参数计算	(87)
§ 4.1	绕组电感计算的磁场分析法	(88)
4.1.1	绕组磁链与电感的计算方法	(88)
4.1.2	磁路饱和对绕组电感的影响	(90)
4.1.3	磁场能量摄动有限元法	(92)
4.1.4	基于 ANSYS 软件的场路耦合法	(99)
§ 4.2	绕组电感计算的绕组函数法	(110)
4.2.1	绕组函数	(110)
4.2.2	绕组函数法的基本原理	(111)
§ 4.3	凸极磁阻转子无刷双馈电机的参数计算	(112)
4.3.1	主副绕组的电感参数	(112)
4.3.2	电感参数的分析	(113)
§ 4.4	磁障与轴向叠片转子无刷双馈电机的 参数计算	(116)
4.4.1	电感参数计算模型	(116)

4.4.2	电感参数的计算与分析	(118)
4.4.3	主要设计变量对电感参数的影响	(121)
§ 4.5	笼型转子无刷双馈电机的参数计算	(124)
4.5.1	电感参数及其谐波分析	(124)
4.5.2	电感参数的转化	(127)
4.5.3	某些设计变量对电感参数的影响	(130)
§ 4.6	电机绕组电感参数的实验测定方法	(131)
4.6.1	静测法	(132)
4.6.2	动测法	(134)
第五章	无刷双馈电机的设计、制造与测试	(136)
§ 5.1	总体设计方案的选取	(136)
5.1.1	电机定转子极数配合	(136)
5.1.2	定子主副绕组结构型式的选取	(137)
5.1.3	转子结构型式的选取	(138)
§ 5.2	定子绕组设计	(138)
5.2.1	主副绕组共用一套绕组	(138)
5.2.2	主副绕组采用双绕组结构	(139)
§ 5.3	磁阻式转子的设计	(140)
5.3.1	凸极式和磁障式磁阻转子	(140)
5.3.2	各向异性轴向叠片式(ALA)磁阻转子	(141)
§ 5.4	笼型转子绕组设计	(143)
5.4.1	笼型转子槽数的确定	(143)
5.4.2	笼条联结方式与制造工艺的选取	(143)
§ 5.5	混合式转子设计	(145)
§ 5.6	无刷双馈电机的测试	(146)
第六章	无刷双馈电机的控制与应用	(150)
§ 6.1	软启动与异步运行的斩波调速控制	(150)
6.1.1	斩波调阻控制原理	(151)
6.1.2	软启动与斩波调速控制的仿真	(152)

§ 6.2	无刷双馈异步交流电机	(154)
6.2.1	运行方式的转化与副绕组的接线方式	(154)
6.2.2	异步向同步运行的转换与功率因数调节	(156)
6.2.3	异步交流电机的应用举例	(157)
§ 6.3	无刷双馈电机调速运行的控制策略	(162)
6.3.1	副绕组的功率流向与控制方式的选取	(162)
6.3.2	无刷双馈电机的控制策略	(163)
§ 6.4	无刷双馈电机的串级调速	(165)
6.4.1	亚同步运行时的串级调速方式	(165)
6.4.2	串级调速系统性能的改善	(167)
§ 6.5	无刷双馈电机的矢量控制	(175)
6.5.1	有位置传感器的主绕组磁场定向控制	(175)
6.5.2	无位置传感器的恒功率角控制	(179)
§ 6.6	无刷双馈电机的直接转矩控制	(186)
6.6.1	无刷双馈电机直接转矩控制的基本原理	(186)
6.6.2	副绕组电压空间矢量与磁链的关系	(187)
6.6.3	无刷双馈电机直接转矩控制的实现方法	(189)
6.6.4	直接转矩控制的 PWM 波形优化	(192)
§ 6.7	采用单向变流器的无刷双馈电机调速系统	(194)
6.7.1	多功能变流器的电路拓扑	(195)
6.7.2	PWM 的控制算法	(197)
6.7.3	单向变流器无刷双馈调速系统	(199)
§ 6.8	无刷双馈电机在变速恒频发电系统中的 应用及其控制	(201)
6.8.1	无刷双馈变速恒频风力发电机的优势	(202)
6.8.2	无刷双馈变速恒频风力发电系统的控制	(206)
6.8.3	变速恒频风力发电系统的模拟试验研究	(208)
6.8.4	多极超低速无刷双馈变速恒频风力发电机	(212)

附录 1	基于 MATLAB 语言的(6+2)极笼型转子 无刷双馈电机参数计算程序	(215)
附录 2	基于 MATLAB 语言的(6+2)极 ALA 转子 无刷双馈电机参数计算程序	(232)
参考文献		(253)

第一章 无刷双馈电机的结构特点 与运行方式

与常规交流电机相比,磁场调制式无刷双馈电机结构复杂,而且具有多种运行方式.本章将分析具有不同定转子结构无刷双馈电机的特点以及多种运行方式的实现方法.

§ 1.1 无刷双馈电机的结构型式

1.1.1 双电机串级联接结构

绕线转子感应电机具有良好的启动和运行性能,并可实现异步、同步和双馈调速等多种运行方式,然而它是一种有刷结构的电机.由于滑动接触和电刷磨损,需要定期维护,不仅降低了运行可靠性和增加了维护费用,而且滑动接触易产生火花,从而限制了有刷电机在具有易燃易爆气体环境中的应用.

要实现绕线转子感应电机的无刷化,最简单的办法是将两台绕线转子感应电机串级联接,即两电机机械上同轴联接,而两电机的转子绕组直接相联,如图 1.1 所示.这样就可以取消滑环和电刷,用两台绕线转子感应电机构成一台无刷双馈电机.如果仅由第一台电机的定子三相绕组 A, B, C 供电而将第二台的定子三相绕组 a, b, c 短接或经过电阻短接,此时该电机组相当于一台无刷绕线转子感应电机,可自启动和异步运行,其中第二台电机定子绕组的作用相当于原来有刷绕线转子感应电机的转子绕组.如果第二台电机的定子三相绕组由变频电源供电,则该电机组可作无刷双馈调速运行.

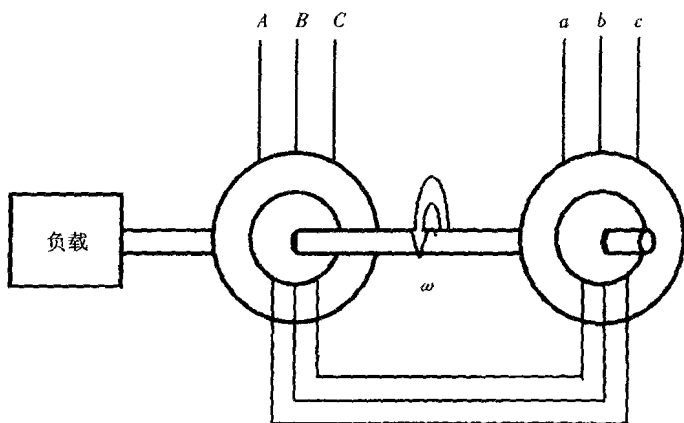


图 1.1 两台绕线转子感应电机串级联接示意图

1.1.2 双定子结构

图 1.1 所示由两台绕线转子感应电机串级联接构成的无刷双馈电机不仅体积较大,而且需要机械上安装调试,很不方便.如果将两台电机的定转子安装在同一个机座内,从外观上是一台电机,不仅电机的体积和重量可以减小,而且用户使用比较方便.由图 1.1 可看出,串级联接的两台电机转子绕组中流过的是相同的电流,故两个转子可合二为一构成一个公用转子,以便于加工制造.这就是图 1.2 所示双定子结构的无刷双馈电机.

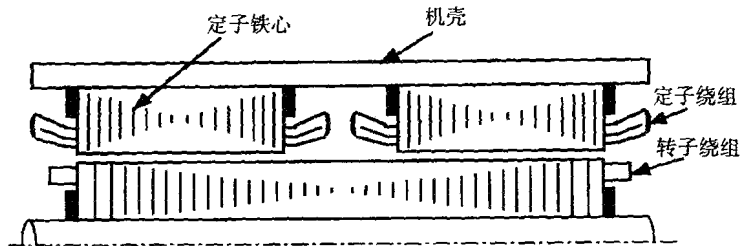


图 1.2 双定子无刷双馈电机结构示意图

为了设计和加工制造的方便,双定子无刷双馈电机可采用完全相同的两个定子装在同一个机座内,同时将转子的铁心和绕组加长即可.然而这并不是必须的.由图 1.1 所示自串级无刷感应电机的运行原理可知,通过第二台电机定子绕组的是转差功率,在电机调速范围不大的情况下该功率远小于由第一台电机的定子绕组输入的功率.因此,双定子无刷双馈电机的两个定子可设计成具有不同的容量,甚至两定子绕组可具有不同的极数.然而这对电机的设计,特别是转子绕组的设计提出了较高的要求,因为转子绕组只有一个,必须使其与两个定子绕组同时具有尽可能好的磁耦合.

1.1.3 单电机结构

尽管与两台串级联接的感应电机相比,双定子结构无刷双馈电机使用方便并在一定程度上减小了安装尺寸与降低了制造成本,然而,由图 1.2 可看出,电机的轴向长度仍然较长,所用材料较多,因而整台电机的制造成本较高.如果能将图 1.2 所示的双定子合二为一,变为具有单一定子铁心的结构,则可构成真正单电机的无刷双馈电机,从而可使电机的体积和制造成本大大降低.

由图 1.2 可知,双定子无刷双馈电机的两定子绕组之间没有直接的电磁耦合关系,它们之间的联系完全是通过转子绕组来实现的.如果将两套极数相同的定子绕组放在同一个定子铁心中而使它们之间没有直接的电磁耦合关系是困难的,然而图 1.2 所示的两个定子绕组并未要求具有相同的极数.采用磁场调制理论,则有可能将具有不同极数的两套绕组放在同一个定子铁心中而使其之间没有直接的电磁耦合关系,从而实现真正单电机结构的无刷双馈电机.

下面举例说明单电机单定子结构无刷双馈电机的构成原理.假如两套定子绕组的极数分别取为 2 极和 4 极,而转子绕组

的极数取 6 极,当定子与转子绕组中皆有电流流通时,则定子,转子绕组的磁动势如图 1.3 所示.

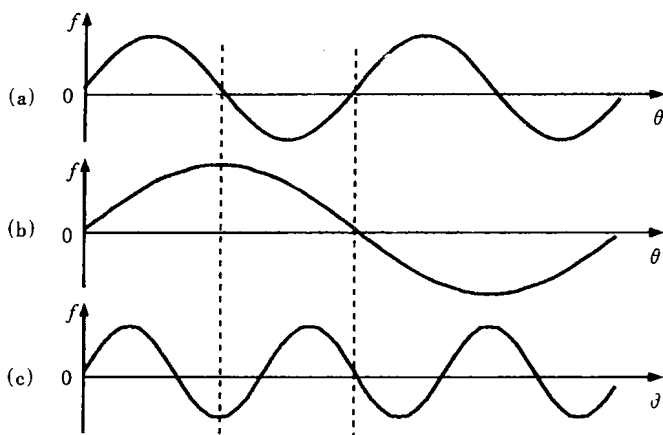


图 1.3 定子与转子绕组磁动势空间分布示意图

- (a) 4 极定子绕组产生的磁动势
- (b) 2 极定子绕组产生的磁动势
- (c) 6 极转子绕组产生的磁动势

假如定子与转子绕组皆为理想的对称分布绕组,从图 1.3 可看出,由于 2 极定子绕组的极距是 4 极定子绕组的极距的 2 倍,因而 4 极定子绕组磁动势产生的电机气隙磁场不会在 2 极定子绕组中产生感应电动势.虽然 2 极定子绕组磁动势产生的磁场会在 4 极定子绕组单个线圈中产生感应电动势,然而经过各极下的线圈相串联后,使每相 4 极定子绕组中仍不含由 2 极定子绕组磁场产生的感应电动势.也就是说,如果不考虑转子的作用,2 极和 4 极两套定子绕组之间没有直接的电磁耦合关系.由图 1.3 可看出,由于 6 极转子绕组的极距既不同于 2 极定子绕组的极距,又不同于 4 极定子绕组的极距,而且与它们也不成 2 的整数倍关系,因而转子绕组皆可与两套定子绕组产生电磁耦合关系.换言之,两套极数不同的定子绕组可通过转子绕组间

接实现电磁耦合.例如,在 4 极定子绕组中通以三相对称交流电,该绕组产生的旋转磁场将在 6 极转子绕组中产生感应电动势及相应的转子绕组电流,进而产生以某种速度相对于定子旋转的转子绕组磁动势及相应的气隙磁场,该磁场又将在 2 极和 4 极定子绕组中分别产生与转子绕组及其旋转有关的速度电动势.反之,2 极定子绕组电流亦可产生类似的电磁耦合关系.如果通过适当的设计使得在具有不同极数的两套定子绕组中产生的速度电动势与通入该绕组的电流具有相同的频率,便可进行机电能量转换,实现电机的无刷双馈运行.这便是单电机磁场调制式无刷双馈电机的基本运行原理.

由于单电机单定子结构的无刷双馈电机具有体积小与成本低等一系列优点,因而是本书主要研究的对象.从电机设计和运行原理来看,单电机单定子结构的无刷双馈电机与采用传统双电机或双定子结构的无刷双馈电机有较大的不同,我们将上述单电机单定子结构的无刷双馈电机称之为磁场调制式无刷双馈电机.在本书以下章节中,如无特殊说明,所说的无刷双馈电机皆指磁场调制式无刷双馈电机.

§ 1.2 无刷双馈电机的定子绕组

单定子磁场调制式无刷双馈电机的定子绕组一般有两种结构,即双绕组结构和单绕组结构,下面分别简述它们的构成原理.

1.2.1 双绕组结构

由上述可知,单定子磁场调制式无刷双馈电机需要有极数不同的两套定子绕组共用一个定子铁心.通常将用以承担主要功率传输的具有 $2p$ 极的定子绕组称为主绕组,而将用以控制电机运行方式的具有 $2q$ 极的定子绕组称之为副绕组或控制绕

组. 尽管主副绕组可合用一套绕组线圈的单绕组结构, 然而, 比较容易设计和实现的方案是采用主副绕组各自独立的双绕组结构. 具有双绕组结构的无刷双馈电机示意图如图 1.4 所示.

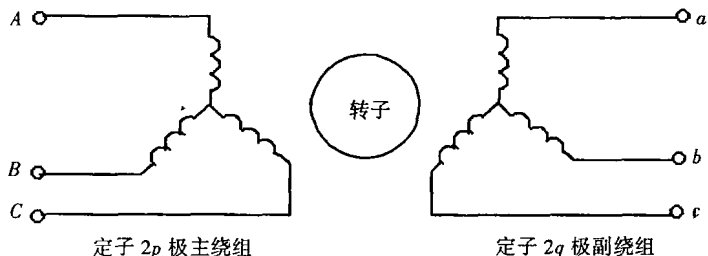
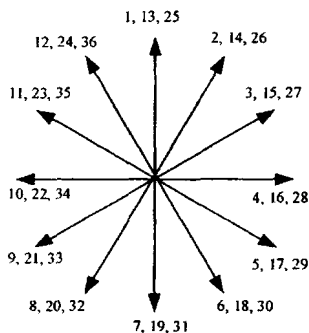
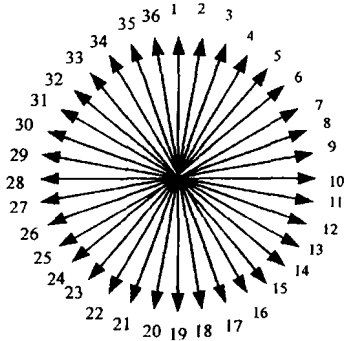


图 1.4 无刷双馈电机的双绕组方案示意图

下面举例说明无刷双馈电机定子绕组采用双绕组方案的构成原理. 设电机的定子铁心具有 36 槽, 主绕组极数为 $2p = 6$, 副绕组极数为 $2q = 2$. 由于主副绕组可以是独立的对称三相绕组, 故主副绕组可按一般交流电机定子绕组分别设计, 只是在选择线圈节距时除了该绕组本身的要求外, 还需要考虑主副绕组之间的耦合问题. 对于 36 槽的定子铁心, 6 极主绕组和 2 极副绕组的槽电动势矢量图分别如图 1.5(a)和(b)所示.



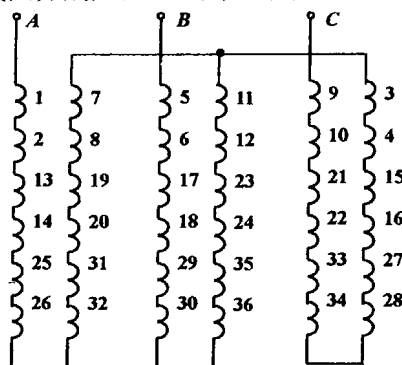
(a) 6 极绕组槽电动势矢量图



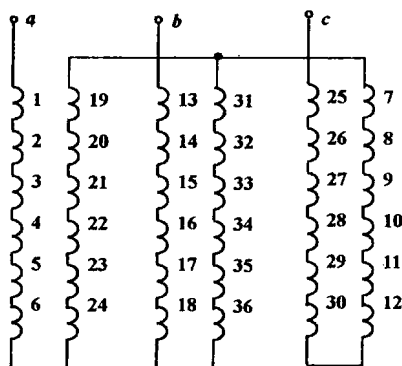
(b) 2 极绕组槽电动势矢量图

图 1.5 36 槽定子主绕组(6 极)副绕组(2 极)的槽电动势矢量图

根据图 1.5 所示星形槽电动势矢量图,可分别确定主副绕组的接线图.三相绕组采用 Y 型接线方式的 6 极主绕组和 2 极副绕组的接线图分别如图 1.6(a)和(b)所示.



(a) 6 极主绕组接线图



(b) 2 极副绕组接线图

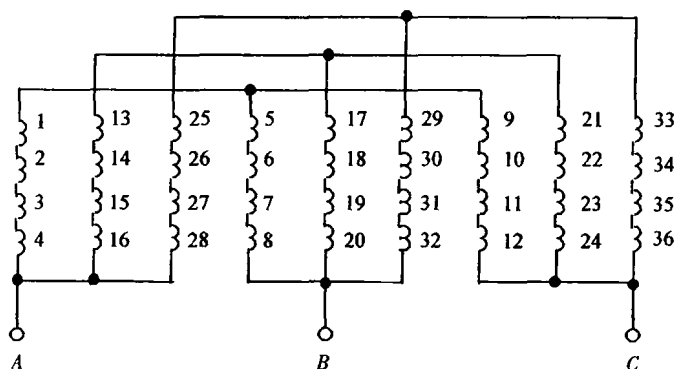
图 1.6 双绕组结构主副绕组接线图

1.2.2 单绕组结构

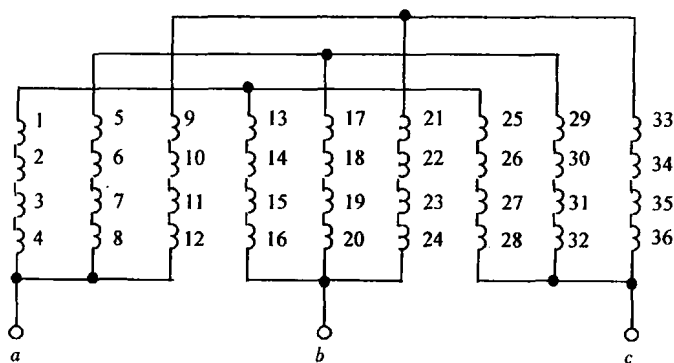
磁场调制式无刷双馈电机的定子绕组也可以采用单绕组结构,即具有不同极数的主副绕组共用一套线圈.从单一的定子绕

组中引出两个端口,从不同端口看进去时,绕组呈现不同的极数 $2p$ 和 $2q$,这样单一的定子绕组同时起到了主、副绕组的作用.两种不同频率的电流同时流入不同的端口时,在电机内形成不同极数、不同转速的旋转磁场.

与双绕组结构相比,单绕组结构的优点是材料利用率较高,同时由于只有一种节距的线圈,绕组嵌线比较容易.然而单绕组



(a) 6 极主绕组接线



(b) 2 极副绕组接线

图 1.7 采用 120° 相带 3Y 联接方式的主副绕组接线图