

# 无刷双馈电机控制策略发展综述

刘航航, 韩力

(重庆大学, 重庆 400044)

**摘要:**在分析无刷双馈电机结构与工作原理的基础上,详细介绍了无刷双馈电机标量控制、直接转矩控制、矢量控制、模糊控制的发展现状,以及不同控制策略的适用场合,并对无刷双馈电机控制策略的发展进行了展望。

**关键词:**无刷双馈电机;工作原理;控制策略

**中图分类号:** TM 343 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004 - 7018(2010)06 - 0069 - 05

## Overview on Control Strategies of Brushless Doubly - Fed Machines

LIU Hang - hang, HAN Li

(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:**Based on the analysis of BDFM structure and operation principle, this paper expounded the development of the scalar control, direct torque control, vector control and fuzzy control, the application of different control strategies. Developing trends of control strategies were also discussed.

**Key words:** brushless doubly - fed machine; operation principle; control strategy

### 0 引言

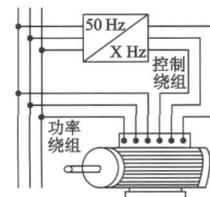
无刷双馈电机(以下简称 BDFM)是在上世纪初由 Hunt 和 Broadway 等学者,在自级联式无刷双馈电机的基础上提出来的<sup>[1-2]</sup>,它具有一套转子绕组和两套不同极对数的定子绕组,相对于自级联电机简化了结构,拓宽了应用范围。BDFM 功率因数可调;系统变频器容量为电机额定容量的 30%左右,降低了系统成本;既可作为电动机又可作为发电机运行;同时与传统有刷电机相比,取消了滑环和电刷结构,使系统的可靠性得到提高,因此 BDFM 具有广阔的应用前景。

国内外学者对 BDFM 进行了广泛的研究,建立了准确实用的数学模型和等效电路<sup>[3-4]</sup>,在此基础上针对 BDFM 提出了多种控制策略,如标量控制<sup>[5-7]</sup>、直接转矩控制<sup>[8-10]</sup>、矢量控制<sup>[11-15]</sup>和模糊控制<sup>[16]</sup>等。目前对 BDFM 控制策略的综述论文已有报道<sup>[6]</sup>,但仅研究部分典型控制策略,对最新的发展尚未进行全面介绍。本文在介绍 BDFM 结构与工作原理的基础之上,较全面地介绍了当前国内外 BDFM 控制策略发展现状,并针对不同控制策略进行了对比分析,为 BDFM 控制策略研究提供参考。

### 1 BDFM 结构与工作原理

BDFM 结构示意图如图 1 所示。其定子侧有两

套极数不同的绕组,彼此相互独立。其中一套绕组是接三相工频电源  $f_p$  的功率绕组,极对数为  $p_p$ ;另一套绕组是接变频电源  $f_c$  的控制绕组,极对数为  $p_c$ ;转子



结构具备“极数转换器”功能。运行时转差功率通过定子绕组输入输出,以实现无刷双馈功能。一般情况下  $f_p$ 、 $f_c$ ,稳态运行时电机转速与定转子绕组极对数、频率的关系为<sup>[2]</sup>:

$$n = 60 \frac{f_p \pm f_c}{p_p + p_c} \quad (1)$$

式中: $f_c$ 前取正号表示控制绕组与功率绕组的电源相序相同, $f_c$ 前取负号表示两个绕组外加电源相序相反。

式(1)表示,当  $p_c$ 、 $p_p$ 、 $f_p$  一定时,可使 BDFM 转速随  $f_c$  改变而改变达到调速的目的。当  $f_c = 0$  时的转速称为自然同步转速, $f_c$  前取负号时的调速称为亚同步调速, $f_c$  前取正号时的调速称为超同步调速。

### 2 BDFM 数学模型

为便于控制 BDFM,首先需要建立其数学模型。国内外学者对 BDFM 进行了广泛而深入的研究,建立了比较准确的数学模型<sup>[3]</sup>,对所建模型进行了试验分析,并获得了比较实用的等效电路和转矩公式<sup>[4]</sup>。

#### 2.1 BDFM 数学模型

BDFM 的数学模型采用转子旋转  $d - q$  轴坐标

收稿日期:2009 - 07 - 21

基金项目:输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主项目(2007DA10512709203)

系的电压电流方程在早期研究中已获得<sup>[3]</sup>:

$$\begin{bmatrix} v_{qp} \\ v_{dp} \\ v_{qp} \\ v_{qc} \\ v_{dc} \\ v_{bc} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p + L_{sp}p & p_p L_{sp} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_p p & p_p M_p r \\ -p_p L_{sp} r & r_p + L_{sp} p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -p_p M_p r & M_p p \\ 0 & 0 & r_r + L_{rp} p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_c + L_{sc} p & p_c L_{sc} r & 0 & 0 & -M_c p & p_c M_c r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p_c L_{sc} r & r_c + L_{sc} p & 0 & 0 & p_c M_c r & M_c p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_c + L_{rc} p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_p p & 0 & 0 & -M_c p & 0 & 0 & r_r + L_r p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_p p & 0 & 0 & 0 & M_c p & 0 & 0 & 0 & r_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qp} \\ i_{dp} \\ i_{qp} \\ i_{qc} \\ i_{dc} \\ i_{bc} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $p_p$ 、 $p_c$  分别为功率绕组和控制绕组的极对数;  $v_{dp}$ 、 $v_{qp}$ 、 $v_{bp}$ 、 $i_{dp}$ 、 $i_{qp}$ 、 $i_{bp}$  分别为功率绕组电压、电流的  $dq0$  轴分量;  $v_{dc}$ 、 $v_{qc}$ 、 $v_{bc}$ 、 $i_{dc}$ 、 $i_{qc}$ 、 $i_{bc}$  分别为控制绕组电压、电流的  $dq0$  轴分量;  $v_{dr}$ 、 $v_{qr}$ 、 $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$  分别为转子绕组电压、电流的  $dq$  轴分量;  $r_p$ 、 $r_c$ 、 $r_r$  分别为功率绕组、控制绕组和转子绕组的电阻;  $L_{sp}$ 、 $L_{sc}$ 、 $L_r$  分别为功率绕组、控制绕组和转子绕组的全电感;  $M_p$ 、 $M_c$

分别为功率绕组、控制绕组与转子绕组之间的互感;  $L_{lp}$ 、 $L_{lc}$  分别为功率绕组、控制绕组的漏感;  $r$  为转子机械角速度;  $p$  为微分算子。

由于 BDFM 正常运行时转子绕组电压为零, 零序分量没有耦合, 因此通常忽略定子两套绕组零序电压、电流, 从而得到以定转子电流为状态变量的电压矩阵方程<sup>[3]</sup>:

$$\begin{bmatrix} v_{qp} \\ v_{dp} \\ v_{qc} \\ v_{dc} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p + L_{sp} p & p_p L_{sp} r & 0 & 0 & 0 & M_p p & p_p M_p r \\ -p_p L_{sp} r & r_p + L_{sp} p & 0 & 0 & 0 & -p_p M_p r & M_p p \\ 0 & 0 & r_c + L_{sc} p & p_c L_{sc} r & -M_c p & p_c M_c r & 0 \\ 0 & 0 & -p_c L_{sc} r & r_c + L_{sc} p & p_c M_c r & M_c p & 0 \\ M_p p & 0 & -M_c p & 0 & r_r + L_r p & 0 & 0 \\ 0 & M_p p & 0 & M_c p & 0 & r_r + L_r p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qp} \\ i_{dp} \\ i_{qc} \\ i_{dc} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

## 2.2 BDFM 等效电磁转矩

通过式 (3) 的转子旋转  $dq$  坐标轴系中的电压方程, 可以得到 BDFM 电磁转矩表达式<sup>[3]</sup>:

$$T_e = T_{ep} + T_{ec} = p_p M_p (i_{dp} i_{dr} - i_{qp} i_{qr}) + p_c M_c (i_{dc} i_{dr} + i_{qc} i_{qr}) \quad (4)$$

式中:  $T_{ep}$ 、 $T_{ec}$  分别为功率绕组和控制绕组的电磁转矩。

针对 BDFM 研究中主张转子采用磁阻结构或笼型结构的不同观点, 文献 [4] 对于转子具有磁阻结构或笼型结构 BDFM 进行了深入研究, 从基本电磁关系出发分别分析了其等效电路和电磁转矩表达式, 证明了两种不同转子结构 BDFM 具有相似的等效电路和电磁转矩表达式, 表明不同转子结构在 BDFM 中对定子主、副绕组的磁耦合作用相似。磁阻转子和笼型转子等效电磁转矩分别为<sup>[4]</sup>:

$$T_e = 3(p_p + p_c) L_{pc} I_p I_c \sin[(p_p + p_c)\theta] \quad (5)$$

$$T_e = 3(p_p + p_c) L_{prc} I_p I_c \sin[(p_p + p_c)\theta] \quad (6)$$

式中:  $L_{pc}$  为通过磁阻转子气隙磁导对功率绕组与控制绕组的调制作用产生的互感;  $L_{prc}$  为通过笼型转子对功率绕组与控制绕组之间耦合作用产生的互感;  $I_p$ 、 $I_c$  分别为功率绕组、控制绕组相电流有效值;  $\theta$

为转子参考轴与功率绕组合成磁动势轴线之间的夹角。

## 3 BDFM 控制策略

在获得 BDFM 数学模型与等效电磁转矩的基础上, 可以建立多种不同的控制策略。由于 BDFM 定子两套绕组中仅有一套绕组可控, 控制系统相对于传统单馈电机更加复杂, 转速和负载转矩动态响应性能较差, 在负载突变时容易引起振荡, 因此需采用闭环控制<sup>[5]</sup>。同时在 BDFM 异步运行时具有异步电机的特点, 因此可以借鉴异步电机的控制策略。现有 BDFM 的控制策略主要有标量控制、直接转矩控制、矢量控制、模糊控制等。

### 3.1 BDFM 标量控制

标量控制是直接控制被控量的大小, 而不控制其方向的控制策略。在 BDFM 标量控制中, 即只控制其控制绕组电压的幅值和频率的大小, 以实现对其速度、转矩的控制。这种控制算法简单, 对控制处理器的要求不高, 在 BDFM 发展初期, 由于研究的局限性以及计算机发展水平的限制而被采用。

BDFM 标量控制, 通过对转子位置检测获得速度信号, 无需复杂分解即与给定信号比较, 通过改变

控制绕组电压的幅值、频率达到调速的目的。图 2 为 BDFM 标量控制框图,通过检测速度测量信号与给定信号的偏差以调节控制绕组频率实现速度控制、通过检测功率因数测量信号与给定信号的偏差调节控制绕组励磁电流或电压实现功率因数控制<sup>[5]</sup>。

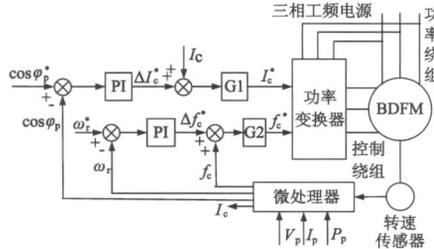


图 2 BDFM 标量控制框图

文献 [6] 通过对比电压频率比恒定控制策略以及分段电压频率比恒定控制策略,得到了分段电压频率比恒定控制策略的转速稳定运行区间更宽,有更为良好运行性能的特性。文献 [7] 建立了电流标量控制下 BDFM 小信号模型,在 BDFM 驱动器的稳

态裕度分析方面十分有效,其控制策略简单,所需传感器少,适用于在调试动态性能要求不高的场合,如风机、泵类负载等。

由于标量控制动态响应性能不高,在需提高动态响应性能场合可以采用直接转矩控制。

### 3.2 BDFM 直接转矩控制

直接转矩控制是用空间矢量的分析方法,以定子磁场定向方式,借助于可控的定子绕组电压和电流对定子磁链和电磁转矩进行直接控制。

文献 [8] 将直接转矩控制策略初步引入到 BDFM 控制之中。由于功率绕组接无穷大电网,可以认为功率绕组电压和磁通量恒定,并由于定转子电阻压降相对较小可忽略不计,因此可以将电机参数、输入量以及输出量转变成控制绕组电压、电流表示的函数。通过估算磁通和转矩的变化,得到控制绕组的给定电压、电流并与检测量比较以改变控制绕组电压、电流,其控制框图如图 3 所示。

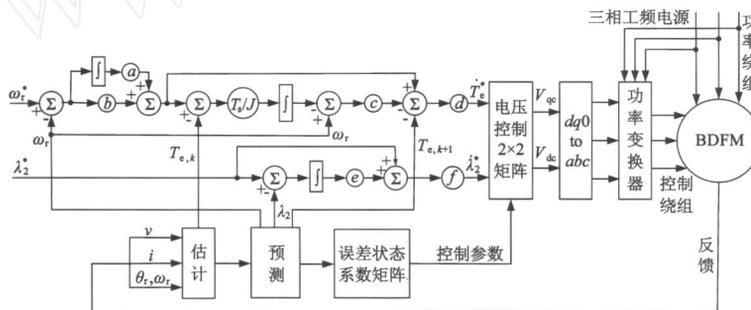


图 3 BDFM 直接转矩控制框图

针对 BDFM 直接转矩控制计算量较大、难以实现的问题,通过改善定子磁链以及转矩的计算方法,磁链、转矩观测器采用单滞环结构;为满足转矩快速响应转矩调节器采用双滞环结构,可实现在不同参考坐标系下对定子磁链以及转矩的计算,简化了磁链、转矩观测器的数学模型,结构简单计算量小,但缺点是转矩脉动较大<sup>[9]</sup>。

为降低转矩脉动、减小计算量,文献 [10] 对经典直接转矩控制策略电压矢量表进行改进,通过分别使用磁通优先和转矩优先的单变量控制条件实行直接转矩控制,该控制算法相对简单,且使用磁通优先优于使用转矩优先的直接转矩控制策略。后续工作可以在采用恒定开关频率的直接转矩控制策略预测方面作进一步的研究。

$$\begin{bmatrix} v_{\varphi p} \\ v_{\varphi r} \\ pM_c \dot{i}_c \\ -pM_c \dot{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p + L_{sp} p & p_p L_{sp} r & M_p p & p_p M_p r \\ -p_p L_{sp} r & r_p + L_{sp} p & -p_p M_p r & M_p p \\ M_p p & 0 & r_r + L_{rp} p & 0 \\ 0 & M_p p & 0 & r_r + L_{rp} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{\varphi p} \\ \dot{i}_{\varphi r} \\ \dot{i}_{qr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} \quad (7)$$

BDFM 功率绕组和控制绕组在写成电流激励等效方程的情况下,可以分为两个独立的子系统建立

### 3.3 BDFM 矢量控制

矢量控制的基本原理是通过测量和控制电机电流矢量,根据磁场定向原理分别对电机的励磁电流和转矩电流进行控制,从而达到控制电机转矩和转速的目的。

对于 BDFM 矢量控制策略需要磁链与转矩的解耦,以分别设计转速与磁链调节器,系统快速响应性能不如直接转矩控制,但是调速范围宽,可以实现连续控制<sup>[17]</sup>。

#### 3.3.1 BDFM 双同步坐标轴系的建立

由于 BDFM 同样可以通过改变控制绕组电流实现调速目的,因此可以将式 (3) 等效为电流激励形式<sup>[18]</sup>:

其双同步坐标轴系模型。当各自建立同步旋转坐标系时,所有子系统的电气参数在稳态运行时将会变

成恒定分量。图4表示了转子坐标轴系与同步坐标轴系的关系<sup>[18]</sup>,其中上标<sub>pe</sub>为功率绕组同步坐标系;上标<sub>ce</sub>为控制绕组同步坐标系;上标<sub>r</sub>代表转子坐标系;<sub>pe</sub>、<sub>ce</sub>分别为功率绕组和控制绕组坐标系与转子坐标系夹角;<sub>p</sub>、<sub>c</sub>、<sub>r</sub>分别为功率绕组与控制绕组电角速度以及转子机械角速度。

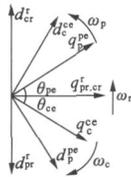


图4 转子和同步坐标轴系

### 3.3.2 BDFM 转子磁场定向矢量控制

通过建立 BDFM 双同步坐标轴系数学模型,使得磁场定向的原则可以应用于控制绕组子系统。通过功率预测系统和电磁转矩估计建立起转子磁场定向的控制算法,以实现 BDFM 转子磁场定向矢量控制。控制框图如图5所示,该控制算法需要测量功率绕组端和转子角速度等数据<sup>[11]</sup>。

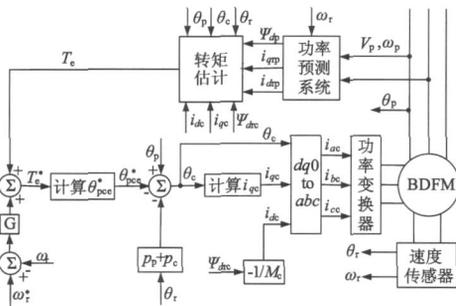


图5 BDFM 转子磁场定向矢量控制框图

将转子磁场定向的矢量控制策略应用于 BDFM,其动态响应良好,但转子参数变化影响系统磁链的控制精度,未考虑磁路饱和,系统调转速范围不够宽<sup>[12]</sup>。

### 3.3.3 功率绕组磁场定向 BDFM 矢量控制

为了获得和绕线型转子感应电机相同或更高的性能,根据感应电机矢量控制理论,可以获得 BDFM 的矢量模型<sup>[19]</sup>。通过对 BDFM 同步运行模式的稳态分析,可以获得其静态工作近似表达式。以功率绕组电压为参考可以获得功率绕组电流 *d* 轴分量表达式:

$$i_{dp} = K_i i_{ic} \quad (8)$$

$$i_{qp} = K_v \frac{v_p}{p} - K_i i_{ic} \quad (9)$$

式中:  $K_v$ 、 $K_i$  为与电机参数有关的常数;  $p$  为功率绕组磁场角速度。

总的电磁转矩可以表示为:

$$T_e = \frac{3}{2} \left[ \frac{P_b + P_c}{p} v_p i_{dp} - \frac{P_b}{p} i_{qp}^2 \right] \quad (10)$$

式中:  $v_p$  和  $i_p$  分别为功率绕组的电压和电流。

从式(8)、式(9)、式(10)可以得出,在认为功率绕组电压恒定的情况下,通过 BDFM 矢量模型所获得稳态功率电流 *d*、*q* 轴分量分别与控制电流 *d*、*q* 轴分量线性相关,同样电磁转矩主要由功率电流的绝对值及其 *d* 轴分量产生,因此需要确定功率绕组磁场位置,以使用功率绕组磁场定向的参考系。相对于转子磁场定向的磁场控制策略,控制系统功能简单,可以获得较好的动态响应性能;功率绕组电流以及有功功率可以调节;可以避免非线性的影响。但需要提高系统的动态响应性能以及减少系统对传感器的要求<sup>[13]</sup>。

采用定子磁场定向的功率绕组和控制绕组之间存在交叉耦合补偿,因此不容易实现完全解耦。通过数学推导将 BDFM 模型适当简化,可以降低功率绕组磁场定向的矢量控制器设计难度,以实现速度和无功功率控制,控制框图如图6所示。在稳态运行时满足各种控制要求,进一步增强了 BDFM 作为风力发电机的适用性<sup>[14]</sup>。

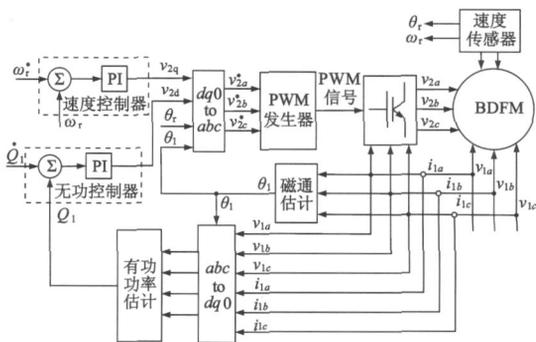


图6 BDFM 功率绕组磁场定向矢量控制框图

利用现代控制理论方法,可以为 BDFM 的控制策略提供更多的选择。滑模结构作为现代控制理论方法之一,可以用到 BDFM 风力发电控制之中,调节有功功率和无功功率。该控制策略中选取有功功率与无功功率的测量值与给定量之间的误差作为滑膜面,并取相应的 Lyapunov 函数,可以得到滑模功率解耦控制规律。该控制策略可以成功实现对有功功率和无功功率的解耦控制以及对风能的最大功率跟踪<sup>[15]</sup>。

### 3.4 BDFM 模糊控制

针对直接转矩控制与矢量控制的不足,可采用模糊控制策略,设计相应的模糊控制原则,以改善 BDFM 控制策略的控制性能。该控制策略思想简单,硬件实现较为方便,对控制对象模型要求不高,能够有效抵抗不同原因扰动对控制性能的影响。

图7为模糊控制器的一般结构,将模糊控制理论引入 BDFM 直接转矩控制策略中,采用模糊控制

器自动合理选择电压空间矢量,能够有效降低转矩脉动,改善定子电流及磁链波形<sup>[16]</sup>。

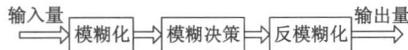


图7 模糊控制器的一般结构

#### 4 BDFM 控制策略发展展望

要进一步提高 BDFM 的运行性能,需要优化改进现有的控制策略或采取新型的控制策略,以提高控制性能。对现有 BDFM 的数学模型、控制算法等方面需要做进一步的研究。

##### 4.1 控制策略对数学模型的要求

国内外对于 BDFM 现有控制策略所需的数学模型,是在忽略磁路饱和、近似认为磁路为线性、忽略定子两套绕组之间耦合以及忽略高次谐波对定子两套不同极对数的影响之下建立起来的数学模型。要进一步优化发展 BDFM 的控制策略,首先需要对 BDFM 的数学模型进行进一步的改进,逐步建立考虑磁路的饱和与非线性问题、定子两套绕组之间存在耦合问题、高次谐波影响问题的数学模型。通过建立更为精确的数学模型,可以进一步提高 BDFM 控制策略的控制精度、缩短响应时间等。

##### 4.2 BDFM 控制策略的发展趋势

进一步发展 BDFM 的控制策略,根据不同应用场合采取不同的控制策略,需要对现有的控制策略做进一步改进、优化。针对 BDFM 应用于风力发电系统中,需要发展优化矢量控制策略以提高系统调节功率精度;发展新型的控制策略以解决 BDFM 在不同风速下保持功率输出平稳性的问题。

在现有控制策略基础上,寻求具有多种控制策略优点相结合的混合控制策略,或进一步发展新型的控制策略提高系统控制精度以及缩短响应时间。同时由于影响 BDFM 控制策略的参数较多,参数的选取通常由所需控制性能、设计经验以及反复调试来确定,但不能保证选取了最合适的参数值,只对特定问题有较为合理的解决。因此应逐步开展对 BDFM 控制策略的参数选取进行优化研究,发展新型的优化算法,如遗传算法、粒子群算法等,以选取最合适的参数值减少调试时间,提高控制性能。

#### 参考文献

[1] Hunt L J. A new type of induction motor[J]. Journal Institute of Electrical Engineers, 1907, 39: 648 - 667.  
 [2] Broadway A, Burbidge R L. Self-cascaded machine: a low speed motor or high frequency brushless alternator [C]// IEE Proceedings 1970, 114 (7): 1277 - 1290.  
 [3] Li R, Wallace A. Two-axis model development of cage-rotor brushless double-fed machines[J]. IEEE Transactions on En-

ergy Conversion, 1991, 6 (3): 453 - 460.

- [4] 张凤阁,王凤翔,徐隆亚.磁阻和笼型转子无刷双馈电机的统一等效电路和转矩公式[J].中国电机工程学报,1999,19(11):28-31.  
 [5] Zhou D, Spee R, Wallace A K. Laboratory Control Implementations for doubly-fed machines[C]//19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Maui, HI, USA, 1993: 1181 - 1186.  
 [6] 杨顺昌,麦苗,向大为.无刷双馈电机的控制策略研究[J].中小型电机,2005,32(1):28-32.  
 [7] Sarasola I, Poza J, Oyarbide E, et al. Stability Analysis of a Brushless Doubly-Fed Machine under Closed Loop Scalar Current Control[C]//IECON 2006 - 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Paris, France, 2006: 1527 - 1532.  
 [8] Brassfield W R, Spee R, Habetler T G. Direct Torque Control for Brushless Doubly-fed Machines[C]//IEEE-AS Annual Meeting Corvallis, USA, 1992, 1: 615 - 622.  
 [9] 刘晓鹏,张爱玲,樊双英.无刷双馈电机直接转矩控制策略的研究[J].微特电机,2006(3):25-31.  
 [10] Sarasola I, Poza J, Rodriguez M A, et al. Direct Torque Control for Brushless Doubly Fed Induction Machines[C]//IEEE International Electric Machines & Drives Conference 2007: 1496 - 1501.  
 [11] Zhou D, Spee R, Alexander GC. Experimental evaluation of a rotor flux oriented control algorithm for brushless doubly-fed machines[C]//IEEE Transaction on Power Electronics Specialists Conference. 1996: 913 - 919.  
 [12] 黄守道,王耀南.无刷双馈电机转子磁场定向控制策略的研究[J].电工技术学报,2002,17(2):34-39.  
 [13] Poza J, Oyarbide E, Roye D. New vector control algorithm for brushless doubly-fed machines[C]//2002 IEEE 28th Annual Conference on Industrial Electronics Society. 2002: 1138 - 1143.  
 [14] Shao S, Abdi E, McMahon R. Vector control of the Brushless Doubly-Fed Machine for wind power generation[C]//IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies 2008: 322 - 327.  
 [15] Wang X, Yang J, Zhang X, et al. Sliding Mode Control of Active and Reactive Power for Brushless Doubly-Fed Machine[C]//IEEE International Colloquium on Computing, Communication, Control and Management Guangzhou, China, 2008: 294 - 298.  
 [16] 周欣欣,张爱玲.无刷双馈电机直接转矩控制转矩脉动最小化[J].电机与控制学报,2006,10(6):571-575.  
 [17] 陈伯时.电力拖动自动控制系统-运动控制系统(第三版)[M].北京:机械工业出版社,2003.  
 [18] Zhou D, Spee R. Synchronous frame model and decoupled control development for doubly-fed machines[C]//IEEE PESC Conference 1994: 1229 - 1236.  
 [19] Poza J, Oyarbide E, Foggia A, et al. Complex Vector Model of the brushless doubly-fed machines[C]//Proceedings of the Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation & Motion Ravello, Italy, 2002: B4. 13 - B4. 18.

作者简介:刘航航(1985-),男,硕士研究生,研究方向为无刷双馈电机的设计与控制。