

无刷双馈电机的研究现状及发展前景

席伟, 韩力, 高强

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 无刷双馈电机作为一种兼有异步电机和同步电机优点的新型交流电机, 在变频调速和变速恒频发电领域中越来越受到重视。该文回顾了无刷双馈电机的发展历史, 介绍了无刷双馈电机的定子结构、参数计算、数学模型、控制方法、运行稳定性等方面在国内外的发展现状及前景, 为今后进一步开展无刷双馈电机的研究提供参考。

关键词: 无刷双馈电机; 参数计算; 数学模型; 控制策略; 运行特性

中图分类号: TM 36+ 1

文献标志码: A

文章编号: 1001-6848(2010)09-0080-05

Research Status and Development of Brushless Doubly-fed Machine

XI Wei, HAN Li, GAO Qiang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract As a new type of AC machine combined with the advantages of the asynchronous and the synchronous machines, the brushless doubly-fed machine (BDFM) has been paid more and more attentions to the fields of frequency adjustable-speed motors and variable-speed constant frequency generators. The history, stator and rotor structures, parameter calculations, mathematical models, control strategies and running stability of BDFM were overviewed by this paper. The results offer the reference for the future study on BDFM.

Key Words Brushless doubly-fed machine; Parameter calculation; Mathematical model; Control strategy; Running stability

0 引言

无刷双馈电机 (Brushless Doubly-fed Machine, 以下简称 BDFM) 是一种新型交流电机, 它兼有异步电机和同步电机的共同优点, 不仅结构坚固、运行可靠、易于维护, 可以在无刷情况下实现双馈运行, 而且具有转速和功率因数可调、变频器容量小、系统成本低等特点^[1-3]。因此, BDFM 在大容量的电气传动系统和风力发电、水力发电系统中具有广阔的发展前景, 成为近年来的研究热点之一。

然而, 由于 BDFM 还有一些诸如转子绕组谐波含量大、效率低、参数计算复杂以及控制策略不成熟等问题尚未得到很好解决, 因此至今没有商用系列产品的问世。目前, 对 BDFM 综述论文已有报道^[4-5], 但仅限于介绍数学模型及控制策略, 对 BDFM 最新的一些发展并没有介绍, 对其参数计算以及运行稳定性等理论和技术方面的研究也很少涉及。

本文较全面地分析了 BDFM 的研究现状及发展前景, 并对 BDFM 参数计算和稳定运行机理做了较为深入的论述, 为 BDFM 的进一步研究提供参考。

1 发展历史

BDFM 由串级感应电机发展而来。串级感应电机是将 2 台绕线式感应电机同轴串接起来, 即 2 台电机机械上同轴联接, 而 2 台电机的转子绕组直接相连, 这样就可以取消电刷和滑环, 用 2 台绕线转子感应电机构成 1 台 BDFM。它通过调节控制电机外加电阻值来改变电机的转差功率大小, 从而控制电机的转速变化。由于采用这种调速方法取消了电刷和滑环, 并且有一定的调速范围, 所以引起了人们的广泛兴趣与研究。但是这种 BDFM 体积大, 成本高, 不易安装。

20 世纪初, Hunt 对其进行了改进^[1], 所提出的电机具有 1 套转子绕组和 1 套具有不同极对数的定

收稿日期: 2009-10-09

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)

子绕组, 并且共用 1 个磁路。它可以在电阻控制方式下获得高启动转矩和速度控制, 实现了无刷化。后来 Creedy 对这种电机进行了进一步的改进^[2], 设计了合理的定转子绕组。但是由于定转子绕组极数配合及绕组设计上的种种限制, 该电机未能进入实用。同时, 由于当时电力电子器件和控制技术的限制, 该电机的发展曾一度停滞。

直到 20 世纪 70 年代, Broadway 等人对 Hunt 电机进行了较大改进^[3], 设计出具有笼型结构的转子, 不仅提高了其坚固性与可靠性, 而且满足了 BDFM 对转子磁场极数转换的要求, 将级联式 BDFM 理论向前推进了一大步。

20 世纪 90 年代, BDFM 的 $d-q$ 轴系模型和双同步轴系模型的建立, 为 BDFM 动态特性仿真和控制性能优化提供了坚实的基础。多种控制方法被应用于 BDFM, 如标量控制、矢量控制、直接转矩控制、智能控制等。另外, 电力电子器件和微处理器的发展又进一步促进了 BDFM 的发展。

2 定转子结构

2.1 定子绕组结构

BDFM 在工作时, 2 个定子绕组 (功率绕组和控制绕组) 都需要加励磁电压, 并在电机磁路中产生不同极数的磁场。两个定子绕组磁场只能通过转子来间接耦合, 在定子绕组中不互相耦合。目前, 定子绕组一般有 2 种结构, 即单绕组结构和双绕组结构。为了满足上述定子绕组磁场的要求, 需要对定子绕组进行特殊设计。不少学者分别对单绕组和双绕组连接方式进行了特殊的设计。当采用 1 套绕组产生磁场时, 为使绕组在产生 2 种不同极对数磁场时都能对称分布, 多采用星形多并联支路形式^[6]。当采用 2 套绕组产生磁场时, 设计方案具有较大的灵活性, 可根据谐波要求对绕组进行独立设计。研究表明, 为了减少 2 套定子绕组磁场的直接耦合作用, 在设计 2 套绕组的极对数时, 需要使之极对数之差较大^[7]。

2.2 转子结构

自从“转子磁场极数自动转化”作用机理出现以来, 就一直为研究者所用^[8]。在此基础上, 许多学者又提出了不少新的转子结构, 主要分为笼型结构和磁阻结构。

笼型转子是通过转子磁动势谐波的调制作用来实现定子磁场的耦合, 主要有 3 种不同结构, 它们产生磁场调制作用的原理都相同, 只是在结构和制

造工艺上存在差异, 如图 1 所示。Williamson 等人对笼型转子结构的 BDFM 进行了分析^[8], 并对转子各导条在产生转矩时所起的作用进行了对比研究, 发现少极数磁场下节距较小的转子导体回路产生的转矩较小, 而在多极数磁场下节距接近整距的转子导体回路产生的转矩较大, 因此在设计转子槽和导体分布时, 可以不均匀分布。

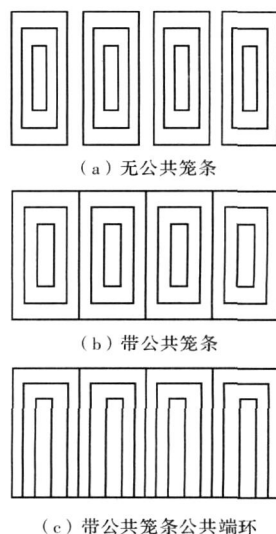


图 1 BDFM 的笼型转子结构

磁阻转子是通过转子磁导谐波对定子磁场的调制作用来实现极对数的转换, 主要有 4 种结构, 如图 (2) 所示。

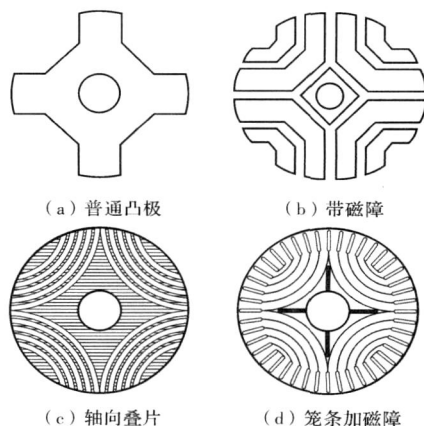


图 2 BDFM 的磁阻转子结构

Ohio 州立大学的 L. Xu 对磁阻式转子结构的 BDFM 进行了研究^[9]。他从 BDFM 定、转子的基本参数入手, 分析了无刷双馈磁阻电机的机电能量转换机理, 并给出了磁阻样机的实验结果。详细研究了普通凸极磁阻转子结构和带磁障的磁阻转子结构对定子磁场调制的特性; 并对笼型转子和磁阻转子结构的 BDFM 转子磁耦合作用进行了对比分析, 同

时对 BDFM 的稳态运行特性进行了实验研究。得出了磁障磁阻式转子 BDFM 具有较好的同步和双馈调速性能, 笼型转子 BDFM 具有较好的启动和异步运行性能。

除了以上两种转子结构外, 有学者提出了一种 $p+q$ 变极绕线型转子 (p 是功率绕组的极对数, q 是控制绕组极对数)。这种新型转子绕组利用两种不同极对数 p 和 q 对应感应电动势在理论上可以有不同回路的特点, 对 p 和 q 两种极对数选择、磁动势相对转向、绕组分布系数等进行设计, 从而提高转子槽导体的利用率。文献 [10] 给出了这种新型绕组几种可能的连接方式, 并与笼型转子做了对比分析, 发现这种新型转子接线方式灵活, 绕组的极对数 p 和 q 可以任意选择, 极对数 p 和 q 绕组有效匝数比也可以根据需要任意调整, 并且谐波含量降低, 转子磁场极数转换效率较高。此种转子的提出为 BDFM 的优化设计开辟了新的方向。

虽然国内外学者对 BDFM 的结构进行了大量深入的研究, 但是它的设计还存在许多问题, 例如, 电机本身存在大量谐波, 转子磁场极数转换效率低、损耗大。因此, 目前 BDFM 研究的关键问题之一仍是电机本体的结构设计和电机性能的优化。提高 BDFM 的效率、促进其实用化是研究的第一目标。

3 参数计算

BDFM 的参数与功率密度和性能指标密切相关, 它是建立数学模型、研究运行性能的基础, 也是评价电机性能优劣的重要依据。一般而言, BDFM 绕组电阻的计算和测量比较容易, 但独特的定转子结构使其电感参数的计算变得十分困难。目前 BDFM 电感参数的求解方法主要有 2 种, 即绕组函数法和有限元能量摄动法。绕组函数法的物理意义是描述当电机某相绕组通入单位电流时沿着电机气隙的磁动势分布状况, 它反映了绕组函数的空间分布规律。该方法建立在磁路理论基础之上, 思想相对简单, 应用较为方便, 但计算精度低, 而且假设条件多, 例如, 忽略了铁心饱和、谐波等因素的影响^[11]。有限元能量摄动法通过绕组电流与磁场能量的关系来计算电感参数, 该方法可以考虑铁心饱和、齿槽效应等因素对电感参数的影响, 计算精度较高, 但求解过程复杂、计算量大。近来, 在传统有限元能量摄动法的基础上, 出现了一种改进的能量摄动法, 它可以明显减少非线性方程的求解次数, 提高计算精度^[12], 但没有考虑电机运行工况变化对电感参数的影响。然而, BDFM 在实际运行过程中, 电感参

数的变化仍然是影响其控制精确性的关键因素。因此, 在今后电感参数计算的研究过程中还需要进一步考虑更多实际因素的影响。

4 数学模型

为了分析 BDFM 的动态性能并对 BDFM 进行有效控制, 首先需要建立其数学模型。目前 BDFM 的数学模型大致分为以下 3 种。

① 多回路数学模型。BDFM 多回路数学模型是以定、转子绕组的环路电流作为状态变量, 在实际 abc 坐标系下建立的数学模型。该模型能较好的反映 BDFM 中电流的分布情况, 但由于求解变量过多, 不利于对电机的动态特性进行分析。

② 转子速数学模型。转子速模型多用于笼型转子无刷双馈电机的分析, 它是将三相电压、电流量转换到与转子同步的 dq 坐标系中, 实现了以瞬时电流为状态变量的数学模型, 该种模型可以较准确地对电机的运行特性进行仿真分析。但当 BDFM 的控制绕组与变频器相连时, 变换为转子速坐标系的控制绕组的物理变量不能与变频器接口变量直接耦合, 给变频器-无刷双馈电机调速系统的仿真计算带来困难。

③ 双同步轴系模型。当两套绕组具有合适的极对数配合时, BDFM 可分解为两个子系统, 即功率绕组子系统和控制绕组子系统, 两个子系统分别建立起以各自定子旋转磁场同步速旋转的 dq 坐标系时, 各子系统中的电流、电压及磁链的空间统一相量都转化为便于控制的直流量, 于是建立起双同步轴系的数学模型, 从而使定子控制绕组物理量直接与变频器及其有的网络联立求解, 为变频调速系统仿真计算提供有力的理论工具。

基于以上这些数学模型, 仿真结果较好地揭示了 BDFM 的运行特性^[13-15], 以及在不同运行方式下定转子的电流、电压和转矩的调节过程, 为电机控制奠定了理论基础。但是这些模型都是在理想化的情况下建立的, 没有考虑定转子齿槽、导体集肤效应和温度的影响, 忽略了磁路饱和、铁耗、谐波等因素, 从而导致理论仿真结果与实际电机特性仍存在差异。因此, 可以把建立与实际电机对应的准确数学模型作为今后研究工作的一个方向。

5 控制方法

BDFM 是由普通感应电机演变而来的, 对于感应电机适用的控制方法, 大体上都适合于 BDFM 的控制。目前, BDFM 主要有以下几种控制方法。

5.1 标量控制

标量控制利用反馈,通过简单的PI调节器实现给定,增加系统的稳定性。控制算法采用稳态等效电路和电压方程,较为简单,对硬件要求不高。标量控制与开环控制相比系统调速性能得到了很大改善,但其动态性能指标仍较低^[16]。

5.2 矢量控制

该控制方法建立在BDFM的双同步轴系模型基础之上,采用与普通异步电机类似的矢量控制方法,实现对电机转矩、有功功率和无功功率的有效控制。其中主要包括转子磁场定向控制策略和定子磁场定向控制策略,前者主要针对BDFM作为电动机运行,以转矩为控制目标,后者则是针对BDFM作为发电机运行,以功率为控制目标,两者共同之处都是采用双同步轴系模型。

BDFM矢量控制策略的实现难度与异步电机的实现难度相当。虽然在BDFM转子磁场定向控制中忽略了一些因素,但其动态性能比较优良,可满足大部分要求。从控制效果、实现难度及研究现状考虑,选择转子磁场定向控制方式对BDFM较为合适。目前,国外有学者将此种控制方法应用在实验样机控制中,并取得了较好的动态效果^[17]。

BDFM定子磁场定向控制策略主要应用在风力发电中,目前尚处于实验研究阶段,并且对BDFM定子磁链定向矢量控制策略进行了相关的仿真研究,从理论上证明了其控制的有效性^[18]。

5.3 直接转矩控制

这种控制策略是借助三相定子电压和电流来计算磁链和转矩,并通过磁链和转矩的直接跟踪实现PWM控制。直接转矩控制摒弃了矢量控制技术中过于繁杂的解耦思想,使系统较矢量控制简洁明了,控制性能较为优越。但该方法计算量较大,需要采用高速微处理器,因而成本较高。

近来,在直接转矩控制基础上的模型参考自适应控制策略^[19],由于采用新型的磁链、速度自适应观测器,并构建了一种无速度传感器控制系统,使得BDFM对负载惯量及电机参数的变化不敏感,提高了系统的稳定性和鲁棒性,达到了较好的控制效果。但这种方法的实现更加复杂,而且其设计严重依赖于精确的数学模型和对参数的准确辨识,目前还处于理论研究及实验仿真阶段。

5.4 智能控制

该控制方法是通过模糊逻辑和神经网络等技术

来实现BDFM的静态和动态控制。模糊控制是一种不依赖于被控对象数学模型的仿人思维的控制技术,它利用专家经验设定控制规则和进行模糊推理及判决,而神经网络对环境的变化具有很强的学习能力,两者结合可以优势互补,保证了模糊神经网络的推理和学习功能的实现。此种控制方法的提出主要是因为上述的闭环控制方案存在非线性、参数变化、扰动及噪声等控制问题。研究表明^[20-22],在对BD-DM此类数学模型较复杂的控制对象进行控制时,使用模糊控制、神经网络控制及专家自适应控制等智能控制方法,能够加快系统响应,减小超调量和调节时间,提高系统的鲁棒性,实时控制效果好。但是,智能控制策略还有许多理论和技术问题尚待解决,如智能控制器主要依靠经验设计,对系统性能缺少客观的理论预见性。另外,到目前为止,仅仅依靠智能控制还很难理想地解决上面提到的问题,很多情况下它是和其他控制方法结合在一起使用,取长补短,形成交叉综合的控制技术。

总之,BDFM的控制方法比较复杂,具有优良的静、动态性能的控制策略尚不成熟,有待进一步研究和改进,加快向实用化方向推进的步伐。

6 运行稳定性

通过对BDFM运行特性分析可知,BDFM转速由功率绕组和控制绕组的频率、相序及极对数决定。然而目前对BDFM运行稳定性的研究较少,尚未形成定论。已有研究表明,当功率绕组保持恒频恒压,改变控制绕组电压大小时,BDFM稳定运行的最大转矩不变,但是稳定转速范围发生了变化,而且电压越高,稳定转速范围越宽;改变控制绕组上最大允许电流时,BDFM稳定转速范围不变,但是稳定运行的最大转矩发生了变化,并且允许流过控制绕组的电流越大,最大转矩越高^[23-26]。由此可见,BDFM的动态特性和稳定性不仅与控制绕组电压的大小有关,还与负载转矩有关,即与静(稳)态时BDFM的矩-角特性有关^[27-28]。静态稳定条件不满足,则动态不可能稳定;静态稳定条件满足时,动态特性还与转动惯量以及控制绕组电源频率是渐变还是突变、如何渐变有关。此外,BDFM的控制绕组与幅值、频率、相位和相序均可调节的四象限运行变频器相连,其电压与电流的关系还与BDFM的参数密切相关,那么,影响BDFM运行稳定性的因素及其判据必然十分复杂。因此,为了对BDFM系统的稳定运行和精确控制提供相应的理论指导,今后尚需对BDFM的运行稳定性机理开展广泛而深入

的研究。

7 结 语

本文回顾了 BDFM 发展历史, 分析了 BDFM 定转子结构、参数计算、控制策略及运行特性等方面的研究现状, 并且阐述了其发展前景。由此可见, 随着研究的进一步深入, BDFM 的电磁理论更加完善, 制造工艺更加先进, 控制方法更加成熟, 样机的性能也不断提升, 高效实用的 BDFM 必将出现, 使 BDFM 的优点得以实现, 而且这些优点都将随着 BDFM 的性能提升而得到更大程度的发挥, 特别是在大容量变频调速系统和变速恒频发电系统中获得广泛的应用, 取得良好的经济和社会效益。

参考文献

[1] L. J. Hunt. A new type of induction motor [J]. *Journal Institute of Electrical Engineers*, 1907, 39: 648-667.

[2] F. Creedy. Development in Multispeed Cascade Induction Motors [C]. *Proc. IEEE*, 1921, 59(6): 511-532.

[3] A. W. Broadway, L. Burbidge. Self cascade machine: a low-speed motor or high frequency brushless alternator [C]. *Proc. IEEE*, 1970, 117(7): 1277-1290.

[4] 章玮. 无刷双馈电机的控制策略 [J]. *中小型电机*, 2000, 27(6): 37-40.

[5] 陈志伟, 杨向宇, 申辉阳. 无刷双馈电机及其调速系统的发展 [J]. *微特电机*, 2006, 24(6): 37-40.

[6] 杨向宇, 励庆孚. 单定子绕组无刷双馈电机的设计研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2001, 20(8): 107-110.

[7] S. Williamson. Generalised theory of the brushless doubly-fed machine Part I: Analysis [C]. *IEEE Proc. Power Appl.*, 1997, 144(2): 72-78.

[8] S. Williamson, A. C. Ferreira, A. K. Wallace, et al. Rotor modeling and development for brushless doubly-fed machines [J]. *Electric and power systems*, 1995, 23(6): 703-715.

[9] Xu L. Analysis of a doubly-fed brushless reluctance machine by finite element method [J]. *IEEE Trans. Power Electronics*, 1991, 11(3): 171-177.

[10] 王雪帆. 一种转子绕组采用变极法设计的新型无刷双馈电机 [J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(6): 108-121.

[11] 张凤阁, 王正, 王凤翔. ALA 转子无刷双馈风力发电的参数计算方法与转子制造工艺探讨 [J]. *太阳能学报*, 2002, 23(4): 498-503.

[12] 王爱龙, 熊光煜. 无刷双馈电机电感参数的计算 [J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(9): 93-97.

[13] Spee R, Wallace A K, Laue H K. Performance simulation of brushless doubly-fed adjustable speed drives [C]. *IEEE Industrial Application Society Annual Meeting*, 1989: 738-743.

[14] Ruqi Li, Alan Wallace, R. Spee. Dynamic simulation of brushless doubly-fed machines [J]. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 1991, 6(1): 445-460.

[15] Zhou D, Spee R. Synchronous frame model and decoupled control development for doubly-fed machines [C]. *IEEE PESC*, 1994: 1229-1236.

[16] Zhou D, Spee R, Wallace A. K. Laboratory control implementation for brushless doubly-fed machines [C]. *Proceedings of 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 1993: 1181-1185.

[17] M. G. Jovanović, Robert E. Betz. The use of doubly-fed reluctance machine for large pumps and wind turbines [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, 38(6): 1508-1516.

[18] 黄守道, 王耀南, 王毅, 等. 无刷双馈电机有功和无功功率控制研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(4): 87-93.

[19] 杨俊华, 吕惠子, 吴捷, 等. 基于波波夫超稳定性的无刷双馈电机直接转矩控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(15): 107-113.

[20] Wang Xiaohong, Yang Jiming. Sliding mode control of active and reactive power for brushless doubly-fed machine [C]. *International Colloquium*, 2008: 294-298.

[21] Wang Qi, Chen Xiaobu. Fuzzy-based active and reactive control for brushless doubly-fed wind power generation system [J]. *IEEE Electrical Machine and Drives*, 2006, 3(1): 848-851.

[22] Zhang Fengge, Jin Shi, Pan Guangjian, et al. Research on H_{∞} mixed sensitivity control of brushless doubly-fed motor [C]. *Int. Conf. of Electrical Machine and System*, 2008: 1531-1534.

[23] 杨向宇, 郭灯塔, 励庆孚. 无刷双馈调速电机运行范围分析 [J]. *微特电机*, 2001, 6(29): 29-31.

[24] 姜建国, 武小杰, 方荣惠. 笼型转子无刷双馈电机的无功功率和稳定性 [J]. *电工技术学报*, 2008, 23(1): 40-47.

[25] Poza J, Oarbile E, Roye D, et al. Stability analysis of a bdfm under open loop voltage control [C]. *Power Electronics and Applications of European Conference*, 2005: 1-10.

[26] S. Williamson. Generalised theory of the brushless doubly-fed machine Part 2: Model verification and performance [J]. *IEEE Proc. Power Appl.*, 1997, 144(2): 123-129.

[27] 杨顺昌, 许昌彪. 无刷双馈电机的稳态转矩-角特性 [J]. *电工技术学报*, 1998, 13(4): 15-19.

[28] Sarasola J, Poza J. Stability analysis of a brushless doubly-fed machine under closed loop scalar current control [C]. *Int. Conf. of Electrical Machine and System*, 2006: 1527-1532.

作者简介: 席伟 (1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为无刷双馈电机。

韩力 (1963-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电机及其控制。

高强 (1985-), 男, 硕士, 研究方向为无刷双馈电机。