

# 不同转子结构无刷双馈电机的运行特性对比

韩力, 高强, 罗辞勇, 李辉

(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:** 在阐述无刷双馈电机(BDFM)不同转子结构特点的基础上, 针对无公共笼条、带公共笼条、带公共笼条公共端环、笼条加磁障、凸极加笼条、ALA 磁阻等6种不同转子结构的BDFM进行了二维瞬态电磁场有限元计算。通过气隙磁场谐波的频谱分析, 比较了不同转子结构对BDFM磁场调制效果的影响。研究了不同转子结构BDFM在单馈异步运行以及双馈同步、亚同步和超同步运行时的转矩与转速动态特性。探讨了在控制绕组频率一定的情况下, 控制绕组电压大小对转矩和转速稳定性的影响。通过与相关文献的对比, 验证了结果的正确性。研究结果揭示了不同转子结构对BDFM磁场调制效果和动态特性的影响, 为BDFM的转子结构优化设计和运行稳定性的深入研究奠定了基础。

**关键词:** 无刷双馈电机; 转子结构; 磁场调制; 动态特性; 有限元

中图分类号: TM 301 文献标志码: A 文章编号: 1007-449X(2010)03-0006-06

## Comparasion on the performance of brushless doubly-fed machine with different rotor structures

HAN Li, GAO Qiang, LUO Ci-yong, LI Hui

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

**Abstract:** By introducing 6 different kinds of rotor structures, which include the cage rotor with or without common bars, the cage rotor with common bars and common end ring, the cage rotor with reluctance and common bars, the salient poles rotor with cage bars, the ALA reluctance rotor, the 2-D transient electromagnetic fields of brushless doubly-fed machine (BDFM) were calculated by finite element method. The air-gap magnetic fields were compared by the harmonic spectrum analysis, and then the magnetic field modulation effects of BDFMs with 6 different rotor structures were discussed. The torque and speed dynamic characteristics of the different BDFMs were researched under the states of single-fed asynchronous operation and doubly-fed synchronous, under-synchronous and over-synchronous operations. The effects of control winding voltage value with a constant frequency on the torque and speed stability were simulated and discussed. The relative characteristics were verified by comparing with other literatures. The results indicate the effects of rotor structures on magnetic field modulation and dynamic characteristics of BDFM, and provide the foundation for the rotor structure design optimization and operating stability intensive research of BDFM.

**Key words:** brushless doubly-fed machine; rotor structure; magnetic field modulation; dynamic characteristics; finite element

收稿日期: 2009-08-24

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研究项目(2007DA10512709203)

作者简介: 韩力(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机优化设计、电机电磁场;

高强(1985-), 男, 硕士, 研究方向为无刷双馈电机;

罗辞勇(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机及其控制;

李辉(1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机及其系统分析。

## 0 引言

作为一种新型交流电机,无刷双馈电机(brushless doubly-fed machine, BDFM)取消了电刷和滑环,具有变频器容量小、转速和功率因数可调、系统成本低等特点,可运行于单馈异步状态和双馈同步、超同步、亚同步等多种不同状态,在变频调速传动领域和变速恒频发电领域具有广阔的应用前景<sup>[1-9]</sup>。

近年来,对BDFM的研究热点主要集中在其工作原理<sup>[1-2]</sup>、等效电路<sup>[3-4]</sup>和控制方法<sup>[5-6]</sup>等方面,而磁场调制机理却是研究BDFM的基础,磁场调制效果是影响BDFM成本、运行性能和推广应用的关键因素<sup>[7]</sup>。目前,在磁场调制效果研究方面,文献[7]以凸极转子BDFM为研究对象,应用绕组函数理论分析了功率绕组和控制绕组的极数配合对BDFM磁场调制效果的影响,认为功率绕组和控制绕组的多极数和近极数配合能够获得较好的磁场调制效果;文献[8]针对笼型转子、凸极转子、带磁障的磁阻转子3种不同结构的BDFM,利用二维瞬态有限元分析方法,在对BDFM气隙磁密进行频谱分析的基础上,比较了他们的磁场调制效果,得出带磁障磁阻转子的磁场调制效果优于笼型转子和凸极转子的结论;文献[9]通过对磁动势的理论分析,研究了BDFM笼型转子结构导条分布规律对磁场调制效果的影响,并对结果进行了有限元验证,发现笼型转子对磁场调制起主要作用的是靠近公共笼条附近的外圈短路环。以上文献主要是针对凸极转子和笼型转子BDFM进行研究,而对转子结构的多种不同变化对比还不够全面。动态特性研究方面,文献[10]通过实验方法,对笼型转子和轴向叠片各向异性(axially laminated anisotropic, ALA)磁阻转子BDFM的运行特性进行了对比研究,发现笼型转子BDFM具有较好的异步运行性能,而ALA磁阻转子具有较好的双馈运行性能;文献[11]利用等效电路对笼型转子BDFM作发电机运行时的效率和功率因数特性进行了计算,并通过样机实验对计算结果进行了验证;文献[12]提出了一种求解BDFM磁场分布和运行特性的场路耦合二维时步有限元方法,并利用该方法对笼型转子BDFM的电流和转矩特性进行了计算。以上文献主要是针对笼型转子BDFM进行研究,而且对其动态特性的分析还不够全面和深入。在稳定性研究方面,文献[13]通过样机实验,发现BDFM的转速稳定运行范围与控制绕组的电压大小有关,电压越高,稳定运行的转速范围越宽;文献[14]通过改进的电路模型和交直流理论,分析

得出了BDFM转速稳定运行所需的控制绕组电压范围,发现当控制绕组的频率一定时,BDFM在亚同步状态比在超同步状态具有更宽广的控制绕组电压稳定区,随着负载的增加,控制绕组电压的最大值和最小值都会减小。文献[13]和[14]虽然提到稳定性的概念,但均没有给出BDFM转矩和转速随时间变化的动态特性波形。

现有文献几乎没有针对笼条加磁障转子和凸极加笼条转子2种新型结构BDFM的研究,而且没有无公共笼条和带公共笼条2种笼型结构BDFM的对比。在前人研究的基础上,本文针对无公共笼条笼型、带公共笼条笼型、带公共笼条公共端环笼型、笼条加磁障、凸极加笼条、ALA磁阻等6种不同的转子结构,以3对极的功率绕组和1对极的控制绕组BDFM为例,应用二维瞬态电磁场有限元分析方法,系统对比研究了他们的磁场调制效果和转矩、转速动态特性,并在此基础上对BDFM运行稳定性进行了探讨,给出了在不同控制绕组电压等级下的BDFM转矩和转速波形。

## 1 BDFM的基本结构和工作原理

BDFM的定子上嵌放有2套彼此独立的3相绕组,其中一套是极对数为 $p_p$ 的功率绕组(取 $p_p=3$ ),他直接与电网联接,其频率 $f_p$ 恒定;另一套是极对数为 $p_c$ 的控制绕组(取 $p_c=1$ ),由变频电源供电,其频率 $f_c$ 可调。定子功率绕组和控制绕组在理论上没有直接的磁耦合,而是通过转子的磁场调制作用来实现机电能量转换<sup>[1,9,15]</sup>。

BDFM常用的转子结构有笼型和磁阻型两大类<sup>[10,15]</sup>,其中又以笼型转子和ALA磁阻转子最具代表性。由于凸极转子的磁场调制效果太差,本文不做研究。笼型转子的结构如图1(a)所示,他可进一步细分为无公共笼条、带公共笼条、带公共笼条公共端环等3种结构形式,如图2所示。BDFM的笼型转子与异步电机的笼型转子结构不同,其特点是转子绕组分别由4个巢组成,而每个巢又由多个短路环组成,依靠转子电流来产生谐波磁场,从而实现转子磁场极数的转换。笼条加磁障转子的结构如图1(b)所示,他是在带公共笼条的笼型转子结构基础上改进而得到的,沿径向开4个槽,形成4个磁障,以增加交、直轴方向上的磁阻差,从而增强磁场调制的作用。凸极加笼条转子结构如图1(c)所示,他是在实心凸极转子的基础上,加上短路笼条,依靠磁路的不对称性来产生谐波磁场,从而完成转子磁场极数的转换。ALA磁阻转子的结构如图1(d)所

示,他的磁极由导磁材料和非导磁材料间隔排列组成,阴影部分为非导磁材料,导磁材料只连接相邻的两个磁极。依靠这种特殊的磁路结构,可以提高转子磁场极数的转换效率,但该转子制造工艺比较复杂。

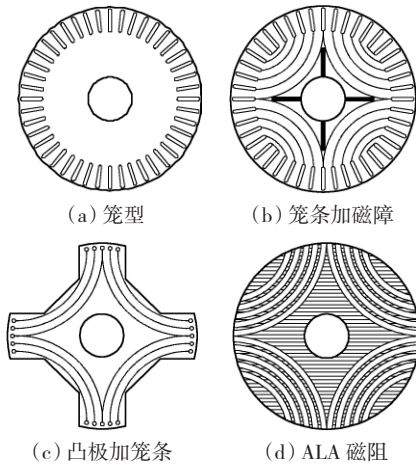


图 1 BDFM 的转子结构  
Fig. 1 Rotor structures of BDFM

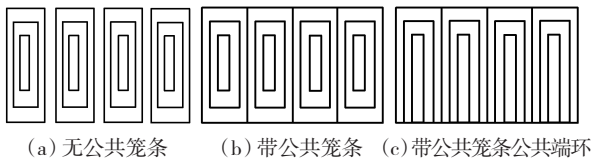


图 2 BDFM 的笼型转子结构  
Fig. 2 Cage rotor structures of BDFM

BDFM 稳态运行时,其转速  $n_r$  与  $p_p \cdot p_c \cdot f_p \cdot f_c$  具有以下关系<sup>[1-9,15]</sup>:

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

式中:当  $f_c$  前取正号时,表示控制绕组与功率绕组的电流相序相同,BDFM 运行在双馈超同步状态;当  $f_c$  前取负号时,表示两套定子绕组的电流相序相反,BDFM 运行在双馈亚同步状态;当控制绕组通入  $f_c = 0$  的直流电时,BDFM 运行在双馈同步状态;当控制绕组短接时,BDFM 运行在单馈异步状态。如果 BDFM 工作在电动状态,通过调节控制绕组的频率  $f_c$  可实现其变频调速运行;如果 BDFM 工作在发电状态时,在不同转速下,通过调节控制绕组的频率  $f_c$  可实现其变速恒频发电运行。

## 2 BDFM 磁场调制效果对比研究

为了比较不同转子结构对 BDFM 磁场调制效果和动态特性的影响,本文采用场路结合的方法,研究了 6 台具有相同定子结构和基本尺寸,以及不同转子结构的样机,其相关结构参数如表 1 ~ 表 5

所示。

表 1 BDFM 基本结构参数

Table 1 Basic structure parameters of BDFM

参数	取值	参数	取值
定子外径	270 mm	功率绕组极对数	3
定子内径	180 mm	控制绕组极对数	1
转子外径	179.2 mm	定子槽数	36
转子内径	60 mm	铁心长度	195 mm

表 2 笼型转子 BDFM 结构参数

Table 2 Structure parameters of cage rotor BDFM

参数	无公共笼条	带公共笼条	带公共笼条公共端环
转子槽数	44	44	44
转子巢数	4	4	4
每巢短路环数	5	6	6

表 3 笼条加磁障转子 BDFM 结构参数

Table 3 Structure parameters of cage rotor BDFM with reluctance and common bars

参数	取值	参数	取值
磁障形状	矩形	磁障长度	30.5 mm
磁障个数	4	磁障宽度	4 mm

表 4 凸极加笼条转子 BDFM 结构参数

Table 4 Structure parameters of salient poles rotor BDFM with cage bars

参数	取值	参数	取值
转子磁极数	4	每极转子槽数	5
转子极弧系数	0.5	转子轭部高度	24 mm

表 5 ALA 磁阻转子 BDFM 结构参数

Table 5 Structure parameters of BDFM with ALA reluctance rotor

参数	取值	参数	取值
转子磁极数	4	每极导磁层数	5
导磁层厚度	5 mm	磁障层厚度	3 mm

为了比较不同转子结构的磁场调制效果,分别建立 6 台 BDFM 的二维瞬态电磁场有限元模型,在定子功率绕组和控制绕组相同的激励条件下,利用 Ansoft/Maxwell 2D 对以上模型进行电磁场计算,在此基础上通过快速傅立叶变换,对气隙磁密波形进行频谱分析,结果如图 3 所示,其中定义每台样机以各自的 3 次谐波为基准(气隙磁密幅值为 100%)。

由于功率绕组极对数  $p_p = 3$ ,控制绕组极对数  $p_c = 1$ ,所以气隙磁场中 3 次谐波和基波是具有机电能量转换作用的有效次谐波,这两种谐波所占比重越大,则磁场调制效果越好<sup>[15]</sup>。从图 3 可见,6 种转子结构中,以各自的 3 次谐波为基准,ALA 磁阻转子的基波比例为 75%,其他高次谐波比例

较小,其磁场调制效果最好;凸极加笼条转子的基波比例为 68%,5 次谐波比例较小,但 7 次和 9 次谐波比例较大,其磁场调制效果次之;笼型转子与笼条加磁障转子的基波比例为 61%,5 次谐波比例较大,他们的磁场调制效果比前两者差。而笼型转子中,带公共笼条笼型转子和带公共笼条公共端环笼型转子的效果一样,基波比例均为 61%;无公共笼条笼型转子稍差,其基波比例为 59%,7 次谐波比例较大。以上结论与文献 [8] 的对比分析结论一致,从而佐证了本文的建模和有限元计算结果的正确性。

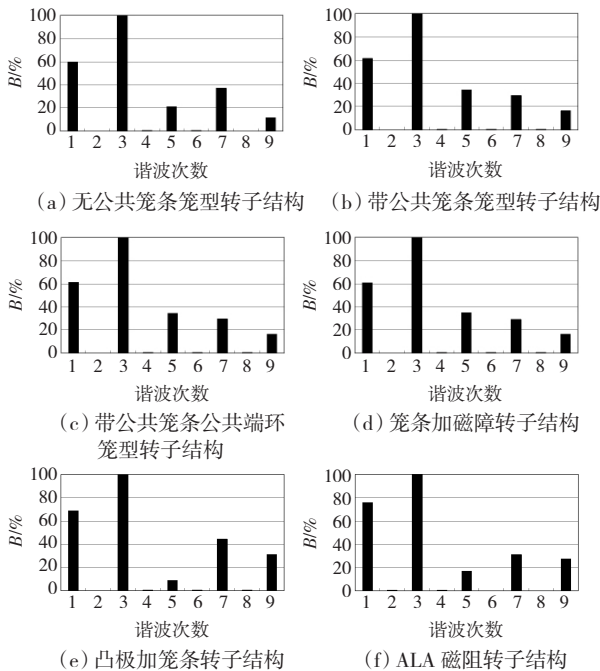


图 3 BDFM 气隙磁密的谐波分析

Fig. 3 Harmonic analysis of air-gap magnetic density of BDFMs

### 3 BDFM 动态特性对比研究

为了对不同转子结构 BDFM 的动态特性进行比较,设激励条件为:功率绕组接 380 V、50 Hz 电源,控制绕组接变频电源。无公共笼条笼型转子、带公共笼条笼型转子、笼条加磁障转子、凸极加笼条转子等 4 种结构 BDFM 的仿真过程为:① 0~0.8 s,控制绕组短路,BDFM 空载异步起动;② 0.8~1.2 s,加 15 N·m 负载,BDFM 单馈异步运行;③ 1.2~1.8 s,控制绕组接 8 V 直流电源,负载转矩不变,BDFM 双馈同步运行;④ 1.8~3 s,控制绕组正相序连接, $U_c = 50\text{ V}$ , $f_c = 10\text{ Hz}$ ,BDFM 双馈超同步运行;⑤ 3~4 s,控制绕组反相序连接, $U_c = 50\text{ V}$ , $f_c = 10\text{ Hz}$ ,BDFM 双馈亚同步运行。利用 Ansoft 对转矩和转速的动态特性仿真结果如图 4~图 7 所示。

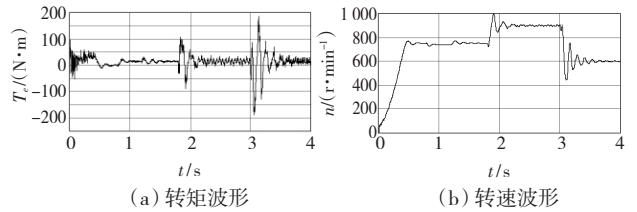


图 4 无公共笼条笼型转子 BDFM 的动态特性

Fig. 4 Dynamic characteristics of cage rotor BDFM without common bars

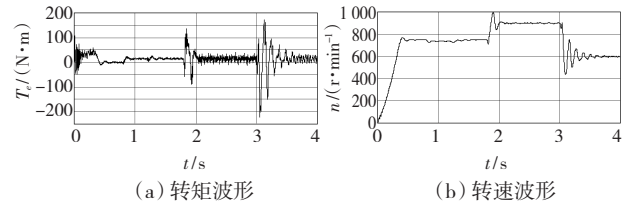


图 5 带公共笼条笼型转子 BDFM 的动态特性

Fig. 5 Dynamic characteristics of cage rotor BDFM with common bars

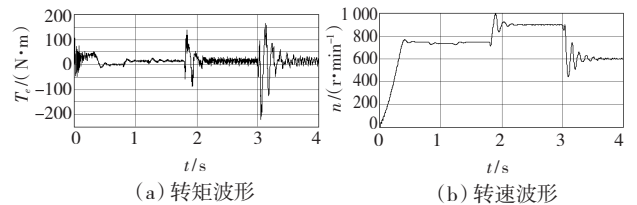


图 6 笼条加磁障转子 BDFM 的动态特性

Fig. 6 Dynamic characteristics of cage rotor BDFM with reluctance and common bars

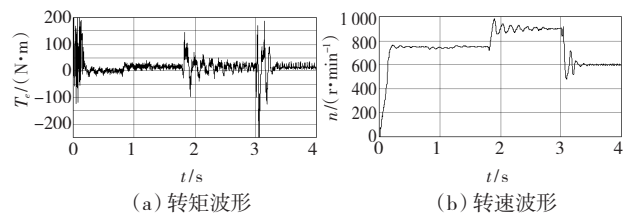


图 7 凸极加笼条转子 BDFM 的动态特性

Fig. 7 Dynamic characteristics of salient poles rotor BDFM with cage bars

考虑到 ALA 磁阻转子 BDFM 起动转矩较小、起动时间较长<sup>[10,15]</sup> 因此其仿真过程调整为:① 0~1 s,控制绕组短路,BDFM 空载异步起动;② 1~1.4 s,加 15 N·m 负载,BDFM 单馈异步运行;③ 1.4~2 s,控制绕组接 5 V 直流电源,负载转矩不变,BDFM 双馈同步运行;④ 2~3 s,控制绕组正相序连接, $U_c = 50\text{ V}$ , $f_c = 10\text{ Hz}$ ,BDFM 双馈超同步运行;⑤ 3~4 s,控制绕组反相序连接, $U_c = 50\text{ V}$ , $f_c = 10\text{ Hz}$ ,BDFM 双馈亚同步运行。转矩和转速的动态特性仿真结果如图 8 所示。

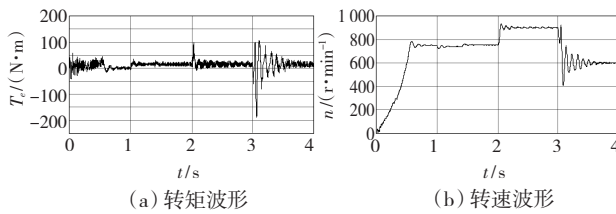


图8 ALA磁阻转子BDFM的动态特性

Fig. 8 Dynamic characteristics of BDFM with ALA reluctance rotor

由图4~图8可知,5种不同转子结构的BDFM均具有自起动能力,具有与常规感应电动机相似的起动特性。此外,当控制绕组加直流电压时,电机转速为750 r/min;当控制绕组加10 Hz正相序交流电压时,电机转速为900 r/min;当控制绕组加10 Hz反相序交流电压时,电机转速为600 r/min。不同运行状态下BDFM的转速大小与式(1)理论分析结果完全相符,从而验证了以上仿真结果的正确性。由于带公共笼条笼型转子BDFM与带公共笼条公共端环型转子BDFM的磁场调制效果和动态特性仿真结果一样,只给出前者的动态特性波形。

对比图4和图5可见,无公共笼条笼型转子BDFM与带公共笼条笼型转子BDFM的动态特性有所差别,主要表现在异步起动上,前者的起动转矩为94 N·m,起动时间为0.684 s;后者的起动转矩为106 N·m,起动时间为0.582 s。显然带公共笼条笼型转子BDFM具有更好的起动特性。此外,对比图6和图5可见,笼条加磁障转子BDFM与带公共笼条笼型转子BDFM的动态特性基本一致。

对比图4~图8可见,凸极加笼条转子BDFM的起动转矩为202 N·m,起动时间为0.465 s;笼型转子BDFM和笼条加磁障转子BDFM的起动转矩为106 N·m,起动时间为0.582 s;ALA磁阻转子BDFM的起动转矩为40 N·m,起动时间为0.792 s。可见凸极加笼条转子、笼型转子和笼条加磁障转子等结构BDFM的异步动态特性优于ALA磁阻转子BDFM。

而对比每台BDFM的双馈运行过程,发现在同步运行情况下,ALA磁阻转子BDFM控制绕组所需的直流电压为5 V,其它转子结构BDFM控制绕组所需的直流电压为8 V,前者明显低于后者。在超同步和亚同步运行情况下,ALA磁阻转子BDFM的转矩波动小,能够很快地进入稳态。

综上所述,凸极加笼条转子、笼型转子和笼条加磁障转子等结构BDFM具有较好的起动和异步动态特性,而ALA磁阻转子BDFM则具有较好的同

步、超同步和亚同步动态特性。上述结论与文献[10]通过实验对笼型转子和ALA磁阻转子BDFM的运行特性做了对比分析结果一致,从而说明了本文的建模和有限元计算的正确性。

## 4 BDFM运行稳定性对比研究

BDFM在双馈运行情况下,保持控制绕组频率不变,控制绕组电压有一个稳定范围,称为BDFM的稳定运行范围,超过该范围BDFM就会失步振荡<sup>[13-14]</sup>。为了比较不同转子结构对BDFM运行稳定性的影响,下面以带公共笼条笼型转子和笼条加磁障转子2种不同结构的BDFM为例进行分析。其仿真过程与图5相同,只是把亚同步和超同步运行时控制绕组的电压从50 V分别变为42 V和90 V两种情况。带公共笼条笼型转子BDFM的转矩和转速动态特性仿真结果如图9和图10所示,笼条加磁障转子BDFM的转矩和转速动态特性仿真结果如图11和图12所示。

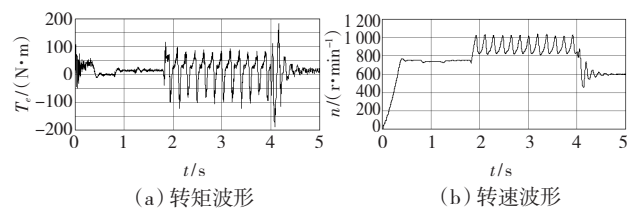


图9 笼型转子BDFM的动态特性

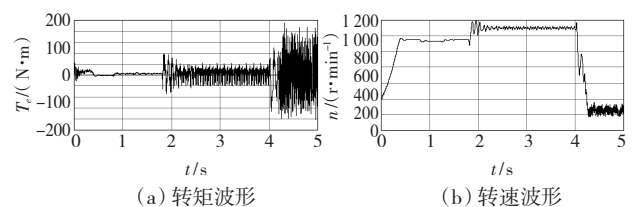
(亚同步和超同步运行时  $U_c = 42$  V)Fig. 9 Dynamic characteristics of BDFM with cage rotor under-and over-synchronous operations when  $U_c = 42$  V

图10 笼型转子BDFM的动态特性

(亚同步和超同步运行时  $U_c = 90$  V)Fig. 10 Dynamic characteristics of BDFM with cage rotor under-and over-synchronous operations when  $U_c = 90$  V

对比图5、图9和图10可见,当 $U_c = 50$  V时,笼型转子BDFM在超同步和亚同步状态下均能稳定运行。而当 $U_c = 42$  V时,BDFM在超同步状态下转矩和转速剧烈振荡,不能趋于稳定;当 $U_c = 90$  V时,控制绕组产生的制动异步电磁转矩增大,导致BDFM在亚同步状态不能带动15 N·m的负载,而出现



反转的现象。

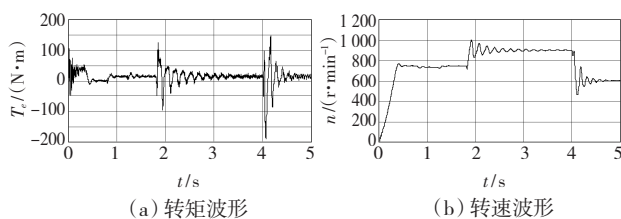


图 11 笼条加磁障转子 BDFM 的动态特性  
(亚同步和超同步运行时  $U_c = 42 \text{ V}$ )

Fig. 11 Dynamic characteristics of cage rotor BDFM with reluctance and common bars under-and over-synchronous operations when  $U_c = 42 \text{ V}$

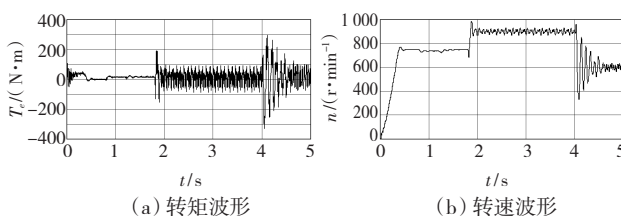


图 12 笼条加磁障转子 BDFM 的动态特性  
(亚同步和超同步运行时  $U_c = 90 \text{ V}$ )

Fig. 12 Dynamic characteristics of cage rotor BDFM with reluctance and common bars under-and over-synchronous operations when  $U_c = 90 \text{ V}$

对比图 6、图 11 和图 12 可见,在 3 种情况下,笼条加磁障转子 BDFM 在超同步状态和亚同步状态下经过一段时间振荡后,均可以稳定运行。只是当  $U_c = 42 \text{ V}$  时,在超同步运行状态下 BDFM 进入稳定的时间较长;当  $U_c = 90 \text{ V}$  时,在超同步和亚同步运行状态下 BDFM 转矩和转速的波动较大。由此发现,相比笼型转子 BDFM,笼条加磁障转子 BDFM 具有更宽的电压稳定运行范围和更好的带负载能力。

## 5 结论

本文较为系统而全面地对比分析了 6 种不同转子结构 BDFM 的磁场调制效果和动态特性,首次对笼条加磁障转子和凸极加笼条转子 2 种新型结构 BDFM 的磁场调制效果和动态特性进行了研究。在此基础上,对带公共笼条笼型转子和笼条加磁障转子 2 种不同结构 BDFM 的运行稳定性进行了对比分析,得到以下结论:

1) 从磁场调制效果来看,ALA 磁阻转子最好,凸极加笼条转子次之,笼型转子和笼条加磁障转子较差;针对 3 种笼型转子结构,带公共笼条和带公共笼条公共端环的效果一样,而非公共笼条的效果稍差。

2) 从笼型转子结构 BDFM 的转矩和转速动态特性来看,带公共笼条与带公共笼条公共端环的效

果一样,而非公共笼条则与之有所差别,主要表现在异步起动时后者的起动转矩小、起动时间长。此外,笼型转子 BDFM 和凸极加笼条转子 BDFM 具有较好的起动特性和异步动态特性,而 ALA 磁阻转子 BDFM 则具有优良的同步、超同步和亚同步动态特性。

3) 笼条加磁障转子 BDFM 与笼型转子 BDFM 的磁场调制效果和动态特性相似,但前者的运行稳定性更好、带负载能力更强。

今后的工作将深入研究 BDFM 的稳定性机理,并争取获得样机测试数据进行对比,进一步验证模型与算法的正确性。

## 参考文献:

- [1] WILLIAMSON S, FERREIRA A C, WALLACE A K. Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. Part 1: Analysis [J]. *IEE Proc Electrical Power Applications*, 1997, 144 (2): 111 - 122.
- [2] 邓先明, 姜建国. 无刷双馈电机的工作原理及电磁设计 [J]. *中国电机工程学报* 2003, 23(11): 126 - 132.  
DENG Xianming, JIANG Jianguo. The principle and electromagnetic design of brushless doubly-fed machines [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(11): 126 - 132.
- [3] 邓先明, 姜建国, 方荣惠. 笼型转子无刷双馈电机的电磁分析和等效电路 [J]. *电工技术学报* 2005, 20(9): 19 - 23.  
DENG Xianming, JIANG Jianguo, FANG Ronghui. Electromagnetic analysis and equivalent circuit of brushless doubly-fed machine with cage rotor [J]. *Transactions of China Electro-technical Society*, 2005, 20(9): 19 - 23.
- [4] ROBERTS P C, MCMAHON R A, TAVNER P J, et al. Equivalent circuit for the brushless doubly fed machine (BDFM) including parameter estimation and experimental verification [J]. *IEE Proc Electrical Power Applications*, 2005, 152(4): 933 - 942.
- [5] 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.  
YANG Junhua, LV Huizi, WU Jie, et al. Direct torque control strategy for brushless doubly-fed machine based on Popov hyperstability theory [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(15): 107 - 113.
- [6] SARASOLA Izaskun, POZA Javier, RODRIGUEZ Miguel, et al. Predictive direct torque control for brushless doubly fed machine with reduced torque ripple at constant switching frequency [C]// *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, June 4 - 7, 2007, Vigo. 2007: 1074 - 1079.
- [7] 张凤阁, 王秀平, 齐颖. 转子极数对无刷双馈电机耦合能力的影响 [J]. *电机与控制学报* 2008, 12(6): 634 - 638.  
ZHANG Fengge, WANG Xiuping, QI Ying. Effect of pole numbers on coupling capability of brushless doubly fed machine [J]. *Electric Machines and Control*, 2008, 12(6): 634 - 638.

(下转第 17 页)

## 4 结 论

本文利用解析法和有限元法对变频器供电时永磁电机的气隙磁场、电磁激振力和噪声的主要频率成分进行了分析得出以下结论:

1) 永磁电机在变频器供电时定子的高次时间谐波电流在气隙磁场中产生频率与变频器开关频率相关的空间气隙磁场谐波。变频器供电时定子磁场的主要谐波频率满足关系式  $f_k = k_1 f_T \pm k_2 f_o$ , 其中  $k_1$  和  $k_2$  为奇偶性相异的正整数, 例如  $f_T + 2f_o, f_T - 4f_o, \dots$ 。

2) 通过研究得出变频器供电时永磁电机气隙磁场谐波频率与电机振动和噪声频率的关系表达式。

3) 永磁电机在正弦波供电时振动噪声的频率主要集中在低频段, 而变频器供电的永磁电机其振动噪声频率主要分布在开关频率及其倍数附近。因此, 要抑制变频器供电永磁电机的振动噪声主要应从开关频率附近的谐波入手, 消除或削弱这些谐波对电机的影响。

## 参 考 文 献:

- [1] LO W C, CHAN C C, ZHU Z Q, et al. Acoustic noise radiated by PWM-controlled induction machine drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2000, 47(4): 880-889.
- [2] WALLACE A K, SPEER R, MAETIN L G. Current harmonics and acoustic noise in AC adjustable-speed drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1990, 26(2): 267-273.
- [3] BLAABJERG F, PEDERSEN J K, RITCHIE E, et al. Determination of mechanical resonances in induction motors by random modulation and acoustic measurement [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995, 31(4): 823-829.
- [4] ZHU Z Q, XU L, HOWE D. Influence of mounting and coupling on the nature frequencies and acoustic noise radiated by PWM controlled induction machine [C] // *Ninth International Conference On Electrical Machines and Drives*, September 1-3, 1999, Canterbury, UK. 1999: 164-168.
- [5] GARCIA - OTERO S, DEVANEY M. Minimization of acoustic noise in variable speed induction motors using a modified PWM drive [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994, 30(1): 111-115.
- [6] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电动机噪声的分析与控制 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.

(编辑: 张诗阁)

(上接第 11 页)

- [8] XU Longya, WANG Fengxiang. Comparative study of magnetic coupling for a brushless doubly-fed machine with reluctance and cage rotors [C] // *IEEE Industry Applications Conference 32nd IAS Annual Meeting*, Oct 5-9, 1997, New Orleans. 1997: 326-332.
- [9] 韩力, 高强, 罗辞勇, 等. 无刷双馈电机笼型转子结构对磁场调制的影响 [J]. *电机与控制学报*, 2009, 13(2): 161-167.  
HAN Li, GAO Qiang, LUO Ciyong, et al. Cage rotor structure effect on magnetic field modulation of brushless doubly-fed machine [J]. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(2): 161-167.
- [10] 张凤阁, 王凤翔, 王正. 不同转子结构无刷双馈电机稳态运行特性的对比实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(4): 52-55.  
ZHANG Fengge, WANG Fengxiang, WANG zheng. Comparative experiment study on the performance of doubly-fed brushless machine with different rotor structures [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(4): 52-55.
- [11] ABDI Ehsan, WANG Xiaoyan, SHAO Shiyi, et al. Performance characterisation of brushless doubly-fed generator [C] // *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Oct 5-9, 2008, Edmonton, Canada. 2008: 1-6.
- [12] 王爱龙, 熊光煜. 无刷双馈电机时步有限元分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(21): 123-127.  
WANG Ailong, XIONG Guangyu. Analysis of brushless doubly-fed machine by time stepping finite element method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(21): 123-127.
- [13] WILLIAMSON S, FERREIRA A C. Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. Part 2: Model verification and performance [J]. *IEE Proc Electrical Power Applications*, 1997, 144(2): 123-129.
- [14] 邓先明, 姜建国, 武小杰, 等. 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.  
DENG Xianming, JIANG Jianguo, WU Xiaojie, et al. Reactive power and stability of brushless doubly-fed machine with cage rotor [J]. *Transactions of China Electro-technical Society*, 2005, 20(9): 19-23.
- [15] 王凤翔, 张凤阁. 磁场调制式无刷双馈交流电机 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2004.

(编辑: 于智龙)