

# 开式绕组无刷直流电机导通模式研究<sup>\*</sup>

罗 玲<sup>1</sup>, 黄 其<sup>1,2</sup>, 张 远<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072;

2. 国家精密微特电机工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550081)

**摘 要:** 三相无刷直流电机 (BLDCM) 广泛应用在电驱动领域。传统星形连接和三角形连接的 BLDCM 绕组之间存在中性点, 导致电机转矩脉动和可靠性较差。提出一种将开式绕组应用于三相 BLDCM 的系统, 介绍了开式绕组 BLDCM 的电路拓扑结构和 8 种导通模式, 分析了开式绕组三相 BLDCM 的电磁方程, 建立开式绕组 BLDCM 的 MATLAB 仿真模型, 仿真开式绕组 BLDCM 在 8 种导通模式下的电流、转矩、转速波形。加工样机并设计试验平台, 测试开式绕组 BLDCM 在两相导通六状态运行模式下的性能, 与星形连接 BLDCM 相比, 开式绕组 BLDCM 调速范围更广、换相转矩脉动减少、机械特性曲线相近。

**关键词:** 无刷直流电机; 电驱动; 开式绕组; 导通模式; 机械特性

**中图分类号:** TM 33    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1673-6540(2020)01-0071-07

**doi:** 10.12177/emca.2019.136

## Operation Modes of Open-Winding Brushless DC Motor<sup>\*</sup>

LUO Ling<sup>1</sup>, HUANG Qi<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuan<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. National Engineering Research Center for Small and Special Precision Motors, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** Brushless DC motors (BLDCMs) are widely used in electrical drive field. As neutral point exists in conventional star-connected and delta-connected BLDCM windings, torque ripples and low reliability may happen to the motor. The application of open winding to three-phase BLDCM system is proposed. The topology and 8 operation modes of open-winding BLDCM system are introduced. The electromagnetic equation of open-winding three-phase BLDCM is analyzed. A mathematical model of the open-winding BLDCM is built with MATLAB Simulink toolbox and the current, torque and speed of the motor under 8 operation modes are simulated. The prototype and the test system are designed. The performances of open-winding BLDCM in two-phase conduction and six-state operation mode are tested. The test results show that, compared with star-connected BLDCM, open-winding BLDCM has a wider speed adjustment range and less commutation torque ripple, exhibiting similar torque-speed characteristics.

**Key words:** brushless DC motor (BLDCM); electrical drive; open-winding; operation mode; torque-speed characteristic

## 0 引 言

三相无刷直流电机 (BLDCM) 具有功率密度高、结构简单、调速性能优良等特点, 广泛应用在工业电驱动领域, 如电动汽车、机床主轴、传输机

械、泵类等<sup>[1]</sup>。三相 BLDCM 大都采用星形连接, 由于三相绕组均连接到中性点, 电流换相时, 非换相绕组的电流会出现下凹<sup>[2]</sup>, 引起转矩脉动。文献[3]指出在 5 种不同的脉宽调制 (PWM) 调制模式下, 在非导通相里均会出现续流。文献[4]指

收稿日期: 2019-09-20; 收到修改稿日期: 2019-11-21

<sup>\*</sup> 基金项目: 贵阳市高新技术产业支持项目 (GXCX-2017-012)

作者简介: 黄 其 (1986—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为汽车特种电机设计、驱动控制和测试。

出续流会使电机产生转矩波动,影响三相 BLDCM 的控制精度;同时由于相绕组之间存在中性点,当某相绕组或逆变桥出现故障,会对其他相绕组的运行产生影响,导致电动机不能平稳运行,甚至烧坏绕组<sup>[5-6]</sup>,不能满足电动机高可靠性要求。

在要求高平稳、高可靠性的电驱动领域中,常采用冗余电机或容错电机,但要求电机的相数多,而且驱动电路和控制算法复杂<sup>[7-8]</sup>。开式绕组将电机绕组间的中性点断开,每相绕组连接各自的驱动电路,特点是:可对各相绕组的电压、电流单独控制,相绕组间电路上影响小;导通相绕组上的 2 个功率开关器件上承受的电压只有直流母线电压的一半<sup>[9-11]</sup>,适用于高可靠性、高电压、大功率驱动场合。

开式绕组三相 BLDCM 的各相绕组相互独立,绕组的电压、电流可以单独控制,为解决三相 BLDCM 的换相转矩脉动抑制和提高容错性提供了新的思路。本文介绍了开式绕组三相 BLDCM 的拓扑结构和导通模型,推导其数学方程,采用 MATLAB 仿真开式绕组 BLDCM 在 8 种导通模式下的电流、转矩、转速波形,最后加工样机进行空载调节特性和负载机械特性测试,并与星形连接 BLDCM 进行对比。

## 1 拓扑结构和导通模式

### 1.1 拓扑结构

开式绕组三相 BLDCM 的相绕组连接各自的单相 H 桥逆变驱动电路,相绕组之间没有中性点,如图 1 所示。每个单相 H 桥采用 4 个开关管,3 个 H 桥连接到同一个直流电源上。图 1 中,  $U_0$  为开式绕组三相 BLDCM 驱动电路电源电压,  $I_0$  为母线电流;  $S1 \sim S4$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为 H 桥  $i$  的 4 个开关管。

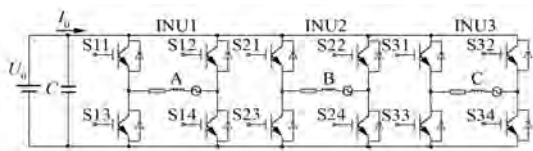


图 1 开式绕组三相 BLDCM 驱动电路

### 1.2 导通模式

开式绕组三相 BLDCM 的每相绕组可以单独控制,有正向导通、关断、反向导通 3 种状态;在电

动机运行的任一时刻,三相绕组可以是一相导通、两相导通或三相导通。三相绕组可能产生的电枢磁动势矢量图如图 2 所示。图 2 中,  $F_A$ 、 $F_B$ 、 $F_C$  为各相绕组正向导通时的磁动势;  $F_{\bar{A}}$ 、 $F_{\bar{B}}$ 、 $F_{\bar{C}}$  为各相绕组反向导通时的磁动势;  $F_{AC}$ 、 $F_{AB}$ 、 $F_{BC}$ 、 $F_{\bar{A}\bar{C}}$ 、 $F_{\bar{A}\bar{B}}$ 、 $F_{\bar{B}\bar{C}}$  为两相绕组导通时的合成磁动势,其中一相绕组正向导通,另一相绕组反向导通;  $F_{ABC}$ 、 $F_{\bar{A}\bar{B}\bar{C}}$ 、 $F_{\bar{A}\bar{B}\bar{C}}$ 、 $F_{ABC}$  为三相绕组导通时的合成磁动势,其中一相绕组正向导通,另两相绕组反向导通,或一相绕组反向导通,另两相绕组正向导通。

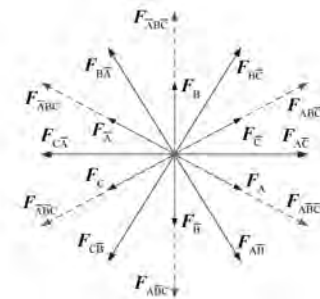


图 2 电枢磁动势矢量图

根据 BLDCM 的工作原理,定子电枢绕组在空间产生跳跃式旋转磁场<sup>[1]</sup>,开式绕组三相 BLDCM 的导通模式有 8 种,其中单向导通有 3 种,正、反双向导通有 5 种。

(1) 单向-单相导通三状态。每个状态只有一相绕组通电,每相绕组单向导通  $120^\circ$  电角度(一个周期为  $360^\circ$  电角度,下同)。

(2) 单向-单相、二相轮流导通六状态。按照一相通电、两相通电轮流导通的模式,每相绕组单向导通  $180^\circ$  电角度。

(3) 单向-二相轮流导通三状态。每个状态均有两相绕组通电,每相绕组单向导通  $240^\circ$  电角度。

(4) 双向-单相导通六状态。每个状态只有一相绕组通电,每相绕组正向导通  $60^\circ$  电角度,断开  $120^\circ$  电角度,反向导通  $60^\circ$  电角度。

(5) 双向-单相、二相轮流导通十二状态。按照一相通电、两相通电轮流导通的模式,每相绕组正向导通  $90^\circ$  电角度,断开  $90^\circ$  电角度,反向导通  $90^\circ$  电角度。

(6) 双向-二相导通六状态。每个状态有二相绕组通电,每相绕组正向导通  $120^\circ$  电角度,断

开  $60^\circ$  电角度, 反向导通  $120^\circ$  电角度。

(7) 双向-二相、三相轮流导通十二状态。按照两相通电、三相通电轮流导通的模式, 每相绕组正向导通  $150^\circ$  电角度, 断开  $30^\circ$  电角度, 反向导通  $150^\circ$  电角度。

(8) 双向-三相导通六状态。每个状态有三相绕组通电, 每相绕组正向导通  $180^\circ$  电角度, 反向导通  $180^\circ$  电角度。

8 种导通模式的电流和反电动势随时间  $t$  ( $\omega$  为转子角速度) 的关系如图 3 所示。

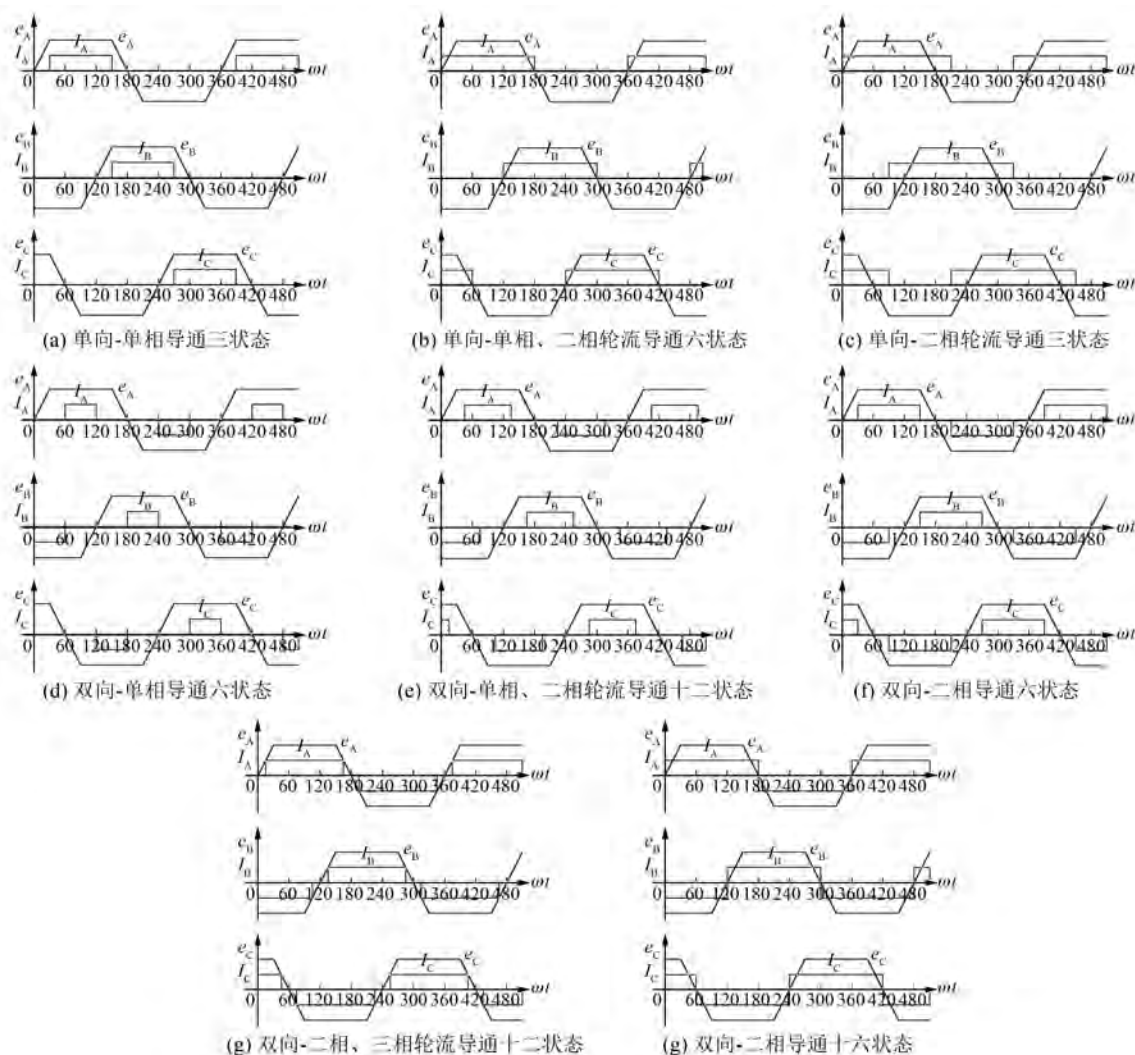


图 3 8 种导通模式

## 2 数学方程

### 2.1 电压平衡方程

开式绕组三相 BLDCM 的各相绕组之间没有中性点, 即相电压平衡方程中没有中性点电压。相绕组电压平衡方程可表示为

$$U_0 = i_x R_x + 2\Delta U + e_x + L \frac{di_x}{dt} \quad (1)$$

式中:  $i_x$ 、 $e_x$ 、 $R_x$ 、 $L_x$  ( $x=a, b, c$ ) 开式绕组三相 BLDCM

的绕组相电流、反电动势、相电阻、相电感;  $U_0$  为母线电压;  $\Delta U$  为一个开关管的饱和管压降。

### 2.2 反电动势

开式绕组三相 BLDCM 的反电动势  $e_x$  是平顶宽度为  $120^\circ$  电角度的梯形波。当电机转速为  $n$  时, 梯形波幅值为

$$E = C_e \Phi_\delta n \quad (2)$$

式中:  $\Phi_\delta$  为气隙磁通;  $C_e$  为电势常数。

结合式 (1) 和式 (2), 当电动机运行到稳定

时,  $di_x/dt=0$ , 则绕组相电流为

$$I_x = \frac{U_0 - 2\Delta U - E}{r_x} \quad (3)$$

### 2.3 母线电流

任一时刻母线电流为三相绕组电流之和:

$$I_0 = \sum i_x \quad (4)$$

开式绕组三相 BLDCM 的每相绕组电流单独控制, 三相绕组电流之和不一定为零。

### 2.4 电磁功率与电磁转矩

电磁功率为

$$P_{em} = \sum e_x i_x \quad (5)$$

电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} \quad (6)$$

式中:  $\omega$  为电动机的角速度。

### 2.5 运动方程

开式绕组三相 BLDCM 的电磁转矩、负载转矩以及转速之间的关系如下:

$$T_{em} - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

式中:  $T_L$  为负载转矩;  $B$  为阻尼系数;  $J$  为转子的转动惯量。

## 3 MATLAB 仿真模型

在 MATLAB/Simulink 环境下, 根据数学方程建立开式绕组三相 BLDCM 仿真模型, 如图 4 所示: 包括开式绕组三相 BLDCM 本体、三相 H 桥逆变器、转子位置检测和换相逻辑控制。

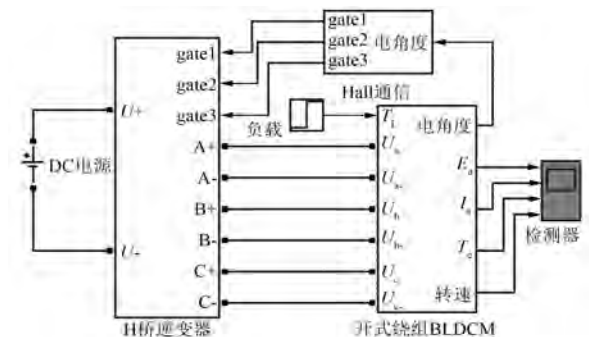


图4 开式绕组三相 BLDCM 仿真模型

### 3.1 开式绕组三相 BLDCM 本体

#### 3.1.1 电压平衡方程模块

根据式(1)建立开式绕组三相 BLDCM 的相

绕组电压平衡方程模型, 如图 5 所示。相绕组反电动势采用可控电压源实现。

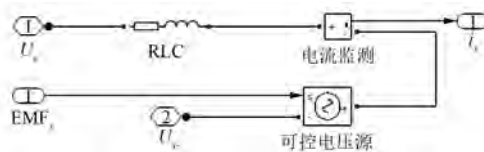


图5 相绕组电压平衡方程模型

#### 3.1.2 反电动势模块

反电动势模型可采用 Simulink 自带查表 (LT) 模块, 通过比较输入信号和设定参数, 查表求值或进行线性插值得到输出结果。设置三相相反电动势  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  是互差  $120^\circ$  电角度的理想梯形波, 根据转子运行角度计算出各相绕组反电动势瞬时值, 如图 6 所示。

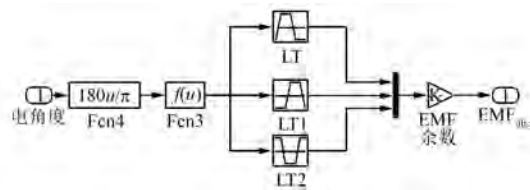


图6 三相绕组的反电动势

#### 3.1.3 转矩模块

由式(6)可得出电磁转矩模块, 如图 7 所示。

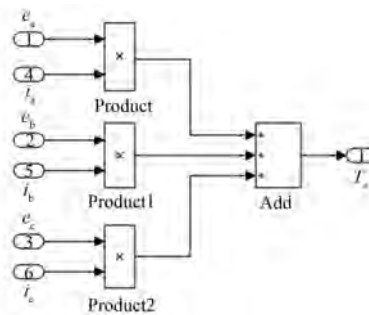


图7 转矩计算模块

#### 3.1.4 运动方程模块

图 8 为电机的机械运动方程模块。对电磁转矩  $T_e$  和负载转矩  $T_L$  的差进行积分可得到电机旋转机械角速度  $\omega$ 。对  $\omega$  积分可得电机转过的角度  $\theta$ , 乘以极对数  $p$  可得电机转过的电角度。

### 3.2 三相 H 桥逆变器

开式绕组三相 BLDCM 的驱动电路采用 3 个 H 桥逆变器, 每个单相 H 桥采用 4 个开关管, 可

直接采用 Simulink 的 SimPowerSystem 工具箱提供的 Universal Bridge 模块, 如图 9 所示。将参数 Number of bridge arms 设置为 2, 参数 Power electronic device 设置成 MOSFET/Diodes。

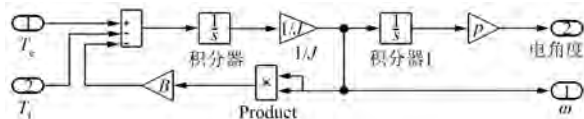


图 8 运动方程模块

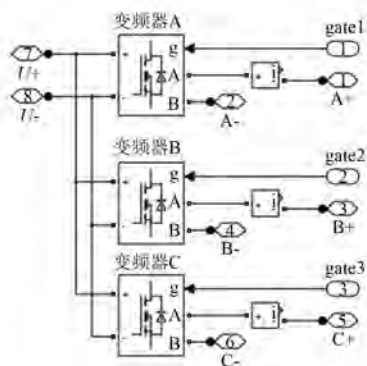


图 9 3 个 H 桥逆变器

### 3.3 转子位置检测和换相控制

3 个 H 桥逆变驱动器的开关信号采用查表模块, 根据转子位置运行角度计算开关信号, 每个 H 桥逆变驱动器对角的 2 个开关管同时开通、关断。三相绕组换相控制如图 10 所示。

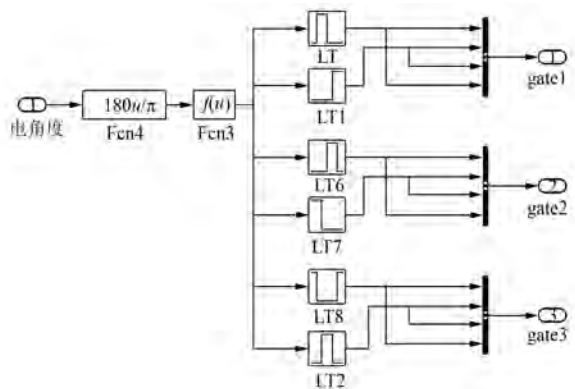


图 10 三相绕组换相控制

## 4 导通模型仿真

以 1 台 10 W、750 r/min 三相 BLDCM 为试验样机进行仿真, 极对数为 2, 额定转矩为 0.13 N·m, 转动惯量为  $0.97 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 反电动

势系数为  $0.3 \text{ V}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ , 相电阻为  $5 \Omega$ , 相电感为  $5.4 \times 10^{-3} \text{ H}$ , 绕组互感为  $2 \times 10^{-3} \text{ H}$ 。绕组分别为连接星形和开式: 星形连接时绕组额定电压为 28 V; 开式连接时绕组额定电压为 14 V, 仿真设置为电机空载起动, 在 0.15 ms 时加入额定负载。

仿真开式绕组三相 BLDCM 在 8 种导通模式下的相电流、转矩、转速波形如图 11(a) ~ 图 11(h) 所示, 图 11(i) 为绕组星型连接时的仿真波形。

由图 11 可知, 开式绕组三相 BLDCM 工作在单向导通模式[图 11(a) ~ 图 11(b)]时, 相绕组利用率不高, 转速和转矩波动均比较大; 随着导通角的增加, 电动机的负载转速上升; 但导通角超过  $120^\circ$  电角度时, 相电流波形的两侧会出现尖峰, 是因为反电势波形为平顶宽度为  $120^\circ$  的梯形波, 根据式(1), 反电动势减少, 相电流增大。在单向-二相轮流导通三状态[如图 11(c)]时, 电动机无法正常运行。在双向导通模式[图 11(e) ~ 图 11(h)]时, 随着导通角的增加电动机的负载转速上升; 导通角超过  $120^\circ$  电角度时, 相电流波形的两侧会出现尖峰; 双向-二相导通六状态模式下电机的电流波动和转矩波动最小。与星型连接三相 BLDCM[图 11(i)]相比, 开式绕组三相 BLDCM 的相电流没有换相下凹, 有利于减少转矩脉动。2 种结构电动机在额定负载下的转速相等。

## 5 样机试验

对试验样机在星型连接和开式连接下分别进行空载、负载试验。试验台如图 12 所示。WT3000 电能综合测试仪测量电动机三相绕组的相电压和电流数据, 并计算出功率, 测功机给电动机加负载, 测量电动机转速并计算输出功率<sup>[12]</sup>。驱动电路中的开关管采用功率场效应管 MOSFETIRF3710。该管导通电阻低 ( $23 \text{ m}\Omega$ ), 在额定相电流 0.6 A 下导通压降为 14 mV, 可忽略开关管压降。

### 5.1 空载调节特性

调节开式绕组 BLDCM 电源电压从 0 ~ 14 V, 测试电动机的转速; 调节星形连接 BLDCM 驱动电源电压从 0 ~ 28 V, 测试电机的转速。2 种结构电动机的空载调节特性如图 13 所示。在相同的电压范围内, 开式绕组 BLDCM 的调速范围更大。

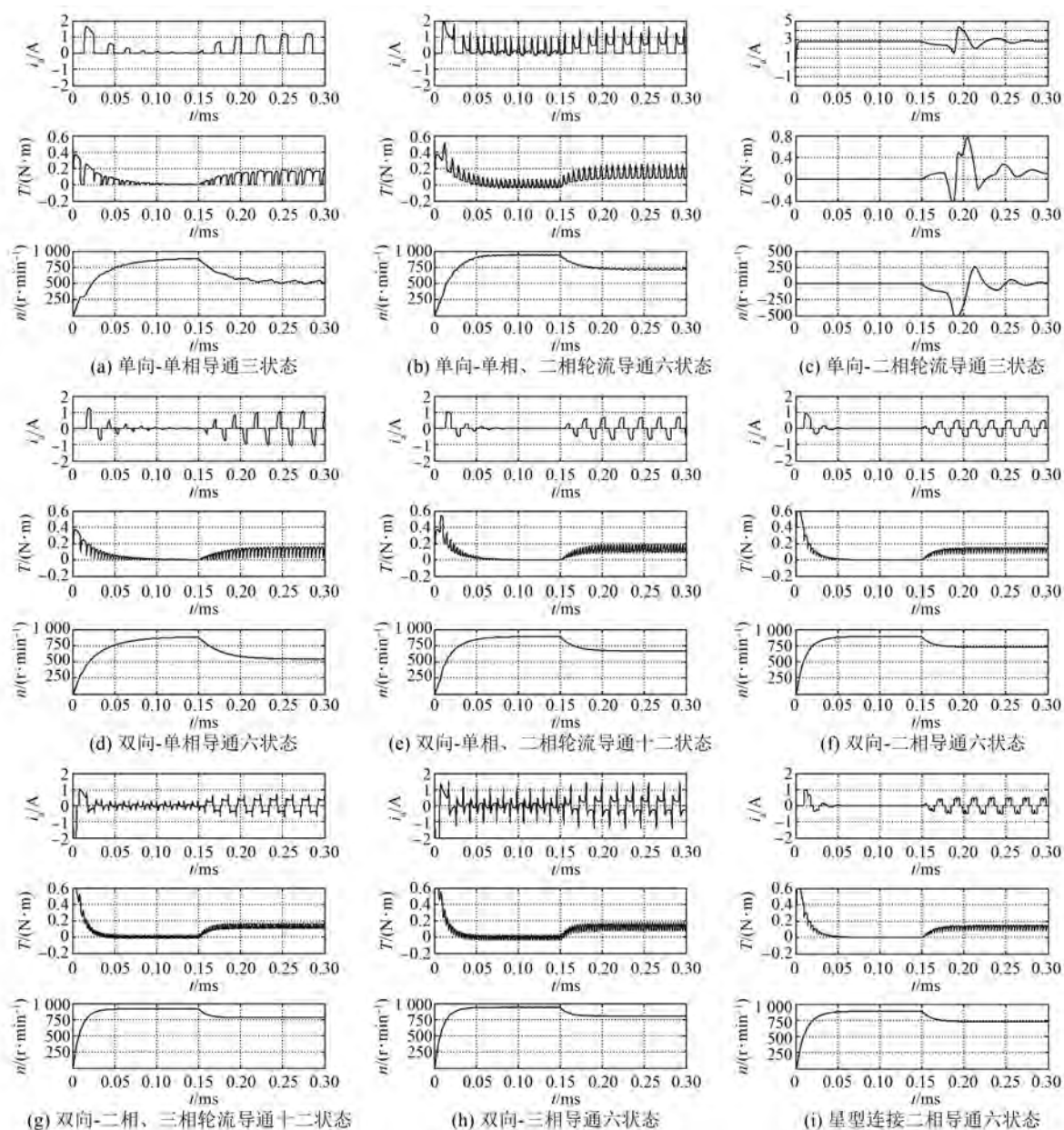


图 11 仿真电流、转矩和转速波形



图 12 样机试验平台

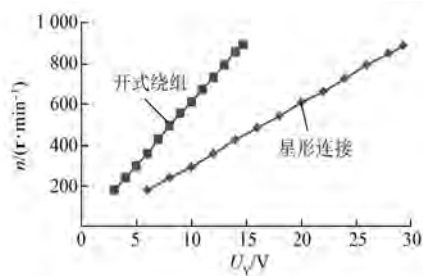


图 13 空载调节特性

5.2 机械特性

设定开式绕组 BLDCM 电源电压为 14 V, 调节负载转矩从 0 mN·m 到额定转矩 130 mN·m, 测试电动机的转速; 设定星形连接 BLDCM 电源电压为 28 V, 调节负载转矩从 0 mN·m 到 130 mN·m, 测试电动机的转速。2 种结构电动机的机械特性如图 14 所示。2 条曲线的斜率相近。2 种结构电动机的负载相电流如图 15 所示。开式绕组三相 BLDCM 的相电流没有换相下凹, 有利于减少换相转矩脉动, 但相电流在导通的后期出现尖峰, 是由绕组感性负载、相电流滞后相反电动势造成的。

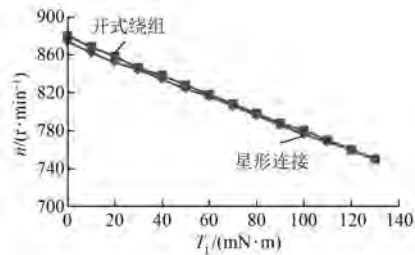


图 14 机械特性

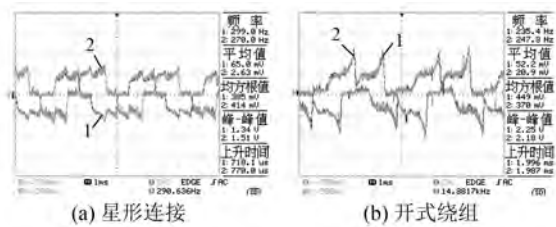


图 15 电流波形

5.3 数学方程验证

三相 BLDCM 相绕组电阻为 5.1 Ω。用 1 台电机拖动开式绕组 BLDCM, 使其工作在发电机状态, 测得该电机在不同转速下的反电动势值和忽略管压降后, 根据式 (3) 计算的相电流与实测相电流如表 1 所示。从表 1 可知, 相电流的计算值与实测值基本一致, 验证了式 (3) 的正确性。

表 1 空载反电动势和相电流

| 空载反电动势                    |       | 负载相电流 |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| $n_0/(r \cdot \min^{-1})$ | EMF/V | 计算值/A | 实测值/A |
| 750                       | 12.19 | 0.492 | 0.503 |
| 796                       | 12.88 | 0.367 | 0.365 |
| 859                       | 13.79 | 0.178 | 0.181 |

6 结 语

为了提高三相 BLDCM 的稳定性和可靠性, 本文提出了开式绕组结构, 根据电磁方程建立 MATLAB 仿真模型, 仿真开式绕组 BLDCM 在 8 种导通模式下的电流、转矩、转速波形, 分析得出开式绕组三相 BLDCM 运行在两相导通六状态模式下性能最好。样机试验结果表明, 与星形连接三相 BLDCM 相比, 开式绕组三相 BLDCM 相电流无换相下凹, 有利于减少换相转矩脉动, 负载机械特性与星形连接时一样。虽然开式绕组三相 BLDCM 的开关器件要多一倍, 但每个器件的耐压降低一半, 适用于高电压、大功率驱动场合。此外还有以下特点:

- (1) 各相绕组的电流可以单独控制, 无论在低速区或是高速区, 方便实现关断相电流下降速率等于开通相电流上升速率, 降低换相转矩脉动。
- (2) 方便测试各相绕组的反电动势, 检测非导通相绕组的反电动势波形可以确定电机的转子位置, 有助于实现无位置传感器控制。
- (3) 各相绕组连接各自的 H 桥逆变电路, 可以方便控制电动机的四象限运行, 实现能量回馈。
- (4) 各相绕组电流单独控制, 方便调节电动机的  $I_d$  和  $I_q$  进行弱磁调速, 扩大电机的调速范围。

【参考文献】

[1] 黄其, 陈翔, 罗玲, 等. 电动汽车用永磁同步电机控制器设计[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(10): 84.

[2] 石坚, 李铁才. 一种消除无刷直流电动机换相转矩脉动的 PWM 调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 110.

[3] 陈健, 于慎波. 无刷直流电机 PWM\_ON\_PWM 调制方式转矩特性研究[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(8): 48.

[4] 王大方, 卜德明, 朱成, 等. 一种减小无刷直流电机换相转矩脉动的调制方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 160.

[5] 林海, 严卫生, 李宏. 无刷直流电动机驱动控制容错方案研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(2): 53.

[6] BELLINI A, FILIPPETTI F, TASSONI C, et al. Advances in diagnostic techniques for induction machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(12): 4109.

(下转第 96 页)

34.2%, 对应的气隙反电动势 11 次和 13 次谐波分别降低了 41% 和 45%; 高速转矩脉动降低了 17.5%, 对应的气隙反电动势 11 次和 13 次谐波分别降低了 46% 和 70%。各区间段 5 次和 7 次谐波基本不变。

(2) 电机优化后谐波响应特性有所改善, 48 阶电机等效声功率辐射等级在低速及中速工况下分别降低了约 5 dB 和 4 dB, 高速工况下降低明显。3 个工况区间电机 24 阶噪声有略微增强, 但该阶噪声功率低, 不影响整体声品质。由装车实测结果可知, 优化前在低速段 1 000~3 000 r/min 出现的啸叫特别是 48 阶噪声大大削弱, 证明该优化方法效果显著。

(3) 优化新能源车用电机振动噪声问题时, 最直接有效的办法就是降低全转速段转矩脉动和负载下对应的气隙感应电动势 THD 含量, 进而降低径向电磁力, 达到改善电机振动噪声的目的。

(4) 结合整车 NEDC 工况, 分析了电机损耗分布, 通过改变铁心叠厚、材料、绕组等参数, 提高了对应工况下的电机效率, 从而使整车续航里程增加。

### 【参考文献】

- [ 1 ] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [ 2 ] HRABOVCOVA V, MAKYS P, RAFAJDUS P, et al. Improved barriers rotor of the reluctance

synchronous motor[J]. Electrical Engineering, 2017, 99: 1325.

- [ 3 ] NIAZI P, TOLYAT H A, CHEONG D H, et al. A low-cost and efficient permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(2): 542.
- [ 4 ] HONDA Y, MURAKAMI H, KAZUSHIGE N, et al. Optimum design of a multi layer interior permanent magnet synchronous motor using reluctance torque [J]. IEEJ Transactions on Industry Applications, 1997, 117(7): 898.
- [ 5 ] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
- [ 6 ] 杨浩东. 永磁同步电机电磁振动分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [ 7 ] 黄辉, 胡余生. 永磁辅助同步磁阻电机设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [ 8 ] 陈益广, 韩柏然, 沈勇环, 等. 永磁同步推进电机电磁振动分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 16.
- [ 9 ] 杨浩东, 陈阳生, 邓志奇. 永磁同步电机常用齿槽配合的电磁振动[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 24.
- [ 10 ] 王晓远, 贺晓钰, 高鹏. 电动汽车用 V 型磁钢转子永磁电机的电磁振动噪声削弱方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4919.
- [ 11 ] 陈彬, 黄辉, 胡余生, 等. 永磁同步磁阻电机径向电磁力及振动抑制[J]. 微特电机, 2017, 45(6): 65.

(上接第 77 页)

- [ 7 ] 刘国海, 黄旭, 周华伟. 基于定子磁链最优的五相永磁电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 6119.
- [ 8 ] 黄其, 罗玲, 白娅梅, 等. 基于 MagNet 的深槽串励电动机设计[J]. 微特电机, 2012, 40(8): 31.
- [ 9 ] BODO N, JONES M, LEVI E. Multi-level space-vector PWM algorithm for seven-phase open-end winding drives[C]// 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2011.

- [ 10 ] WANG Y, PANDA D, LIPO T A, et al. Open-winding power conversion systems fed by half-controlled converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2427.
- [ 11 ] 孙丹, 林斌, 周文志. 开绕组电机系统拓扑及控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 76.
- [ 12 ] 黄其, 陈星宇, 唐扬, 等. 电动汽车电机及控制器智能测试系统设计[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(6): 63.