

# 无刷直流电机在转子偏心故障时的容错控制研究\*

刘昕彤, 王红艳, 张冬梅, 马文华, 刘雅, 杨梅双  
(河北水利电力学院, 河北 沧州 061001)

**摘要:** 在一些工业场合, 无刷直流电机需要在转子偏心故障的情形下保持运行状态, 而传统的控制策略无法有效地实现容错运行。针对这个问题, 提出了一种无刷直流电机在转子偏心时的故障容错控制策略。分析了在传统无刷直流电机控制方法中, 每相定子电流参考在波形上是一致的, 仅存在一定的相位延迟, 而没有考虑电机偏心后导致的反电动势和相电感变化, 因此电机偏心将导致未知的转矩脉动。新型控制策略在传统控制策略的基础上采用了在线估计方法, 获取了相电感和反电动势的值, 从而控制器设置定子电流参考时包含了对偏心故障的考虑和相关运算, 从而使电机能够降低转矩脉动, 具备一定的故障容错运行能力。最后通过对比试验的方法对新型控制策略进行了试验验证。

**关键词:** 无刷直流电机; 反电动势估计; 相电感估计; 转子偏心; 转矩脉动

中图分类号: TM 307 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)05-0121-07

## Fault Tolerant Control Study for Brushless DC Motor with Rotor Eccentricity\*

LIU Xintong, WANG Hongyan, ZHANG Dongmei, Ma Wenhua, LIU Ya, YANG Meishuang  
(Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China)

**Abstract:** In some industrial applications, the brushless DC motor needs to maintain its operating condition in the case of the rotor eccentricity, and the traditional control strategy was difficult to achieve fault tolerance with it. Aiming at this problem, a fault tolerant control strategy for the brushless DC motor with rotor eccentricity was presented. First of all, in the conventional brushless DC motor control method, stator current commands were similar in shape and delayed by corresponding phase differences in each phase, without considering the change of the back electromotive force and the c phase inductance caused by the rotor eccentricity, so the unknown torque ripples would happen. Therefore, a novel control strategy based on traditional control strategy based on the online estimation of the phase inductance and back electromotive force value, thereby setting the stator current reference controller consists of eccentric fault. Then the motor could reduce the torque pulsation, and had the fault tolerant ability. The contrast experiments had been taken to verify that the proposed method at the last.

**Key words:** brushless DC motor (BLDCM); back electromotive force estimation; phase inductance estimation; rotor eccentricity; torque pulsation

## 0 引言

无刷直流电机 (Brushless DC Motor, BLDCM) 目前在许多工业领域, 包括自动控制、航空、医药

器械等领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。其具有很多优点, 诸如使用寿命长, 更好的速度与转矩特性, 动态响应快, 效率高, 运行噪声低, 转速范围高等<sup>[3-8]</sup>。但在一些应用场合, 对 BLDCM 的连续运

\* 基金项目: 河北省自然科学基金项目 (E2016203173)

作者简介: 刘昕彤 (1985—), 女, 讲师, 硕士研究生, 研究方向为电机与电器以及电气传动。

行有较高的要求,因此对 BLDCM 运行时的故障诊断,包括容错运行控制是至关重要的。近年,对 BLDCM 转子偏心故障的辨识和诊断进行了大量研究,主要是频域分析方法,技术逐渐成熟<sup>[9-14]</sup>,但对偏心故障的容错控制却鲜有文献报道。

转子偏心属于电机常见的故障之一,其原因可以是制造、运输或安装等机械原因,也可能由不平衡负载导致转子偏心<sup>[15]</sup>。转子偏心会导致诸如转矩脉动、扭矩失衡和噪声等问题<sup>[16]</sup>。当转子偏心故障发生时,转子中心从定子孔中心偏移,导致气隙不再是均匀分布的,并随转子角的变化而变化。在动态偏心故障条件下,转子旋转将使得最小气隙的位置也随之旋转,导致气隙中的磁场和磁通不均匀分布,从而影响到每相反电动势的波形不同<sup>[17]</sup>。偏心同时还影响了气隙磁阻,进而导致每相绕组电感变化<sup>[18]</sup>。传统的 BLDCM 控制策略,研究重点是其正常运行时的控制精度和响应速度,故没有考虑上述这些变化,因此故障将影响到电机运行性能,产生电磁转矩脉动<sup>[6-8]</sup>。

本文针对转子偏心问题,设计了 BLDCM 的故障容错控制方案。在该方案作用下,偏心导致的转矩脉动可得到有效控制。控制方法是基于故障条件下对相间反电动势和相电感的在线估计,实时调整控制注入电流实现的。该控制方法在 BLDCM 需要故障容错运行的场合有明显的优势,因为其能显著降低偏心对电机运行的影响。最后通过对比试验验证了新型控制方法的有效性。

### 1 BLDCM 绕组电感估计

BLDCM 在转子偏心时每相绕组电感是与正常运行时不一样的,因而必须对相电感参数进行辨识以估计出电机的反电动势。因此,采用一种高频低幅值的正弦电流注入的方法进行相电感参数识别。由于注入的高频电流幅值远远低于电机正常电流,所以对电机的驱动控制没有影响。高频电流伴随着定子控制电流注入到定子绕组中,将在定子上产生一个相应的高频电压。不失一般性,假设电流的通路为 A、C 相绕组,具体的绕组电感估计等效电路如图 1 所示,通过相应测量,可提取出电机端电压对应的高频分量。

根据数字信号处理的相关原理,一个周期离散信号  $x[n]$  可以表示为一个线性指数序列:

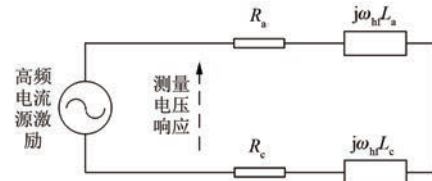


图 1 注入高频点的电感估计等效电路

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{jk\omega_0 n} \quad (1)$$

其中离散基频为  $\omega_0 = 2\pi/N$ , 而  $a_k$  为对应谐波分量的幅值, 具体为

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-jk\omega_0 n} \quad (2)$$

对高频电流激励  $I_s$  和 高频电压响应  $U_s$  施加傅里叶变换, 在  $\omega_0 = \omega_{hf}, k=1$  时, 式(2)可写为

$$a_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\omega_{hf} n} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] [\cos(\omega_{hf} n) - j\sin(\omega_{hf} n)] \quad (3)$$

其中:  $x[n]$  是由数字控制器上的模数采样单元提取的电量波形采样值构成的, 故  $a_1$  具体为

$$a_1 = \frac{1}{N} \times \sqrt{\left\{ \sum_{n=0}^{N-1} x[n] [\cos(\omega_{hf} n)] \right\}^2 + \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \sin(\omega_{hf} n) \right\}^2} \quad (4)$$

计算得到的  $a_1$  即为相电流或线电压的高频分量。

再根据图 1, 在该频率点的定子电压方程为

$$U_s = R_a I_s + j\omega_{hf} L_a I_s + R_c I_s + j\omega_{hf} L_c I_s \quad (5)$$

其中:  $R_a, R_c, L_a$  和  $L_c$  分别为 A 相和 C 相的相电阻和相电感, 假设每相电阻参数是对称相等的, 则:

$$U_s = 2RI_s + j\omega_{hf} (L_a + L_c) I_s \quad (6)$$

进而有:

$$U_s / I_s = 2R + j\omega_{hf} (L_a + L_c) \quad (7)$$

对式(7)求电压和电流的幅值比得到:

$$|U_s| / |I_s| = \sqrt{4R^2 + \omega_{hf}^2 (L_a + L_c)^2} \quad (8)$$

进而有:

$$L_a + L_c = (1/\omega_{hf}) \sqrt{(|U_s| / |I_s|)^2 - 4R^2} \quad (9)$$

因此, 最终得到 A、C 相绕组电感之和, 同理

还可估计出其他相的电感和。

注入高频电流的频率选择非常重要:频率过低影响估计的精度,因为相电感在低频段的阻抗很低,同时一个基波周期能注入的高频周期数较少,影响傅里叶分析计算的精度;频率过高则易产生较大信号衰减,也影响测量精度。因此需要根据实际情况确定注入高频电流的频率,从而进行电机反电动势的估计。

## 2 电机反电动势估计

在偏心条件下电机存在不均匀气隙,磁场和磁通也将不均匀分布,这可能导致相间反电动势波形的畸变。因为电机转矩是电机的反电动势和电流之间相互作用的结果,因此反电动势波形失真会影响电机的电磁转矩,产生转矩脉动。考虑到获取实际 BLDCM 的反电动势波形可以帮助控制器注入适当的电流以减少转矩脉动,因而提出一种 BLDCM 在转子偏心时的相间反电动势估计方法。不失一般性,可给出 A 相和 C 相的相电压  $U_{an}$  和  $U_{cn}$  方程如下:

$$U_{an} = Ri_a + L_a di_a/dt + e_a \quad (10)$$

$$U_{cn} = Ri_c + L_c di_c/dt + e_c \quad (11)$$

式中:  $e_a$ 、 $e_c$ ——电机 A 相和 C 相的反电动势。

线电压  $U_L$  表达式,以及相电流  $i_a$  和  $i_c$  的关系式为

$$U_L = U_{an} - U_{cn} \quad (12)$$

$$i_a = -i_c \quad (13)$$

如图 2 所示为 A 相和 C 相的相间反电动势估计的电路原理。其中图 2(a) 为相应功率器件导通状态时的等效电路,在这种情况下,直流电压极性和回路电流的方向一致。图 2(b) 为相应功率器件关闭,而其反并联二极管续流状态时的等效电路,在这种情况下,直流电压极性和回路电流的方向是相反的。控制器通过功率器件这两种状态的切换控制实现电机输入电流的调节。因此,线电压  $U_L$  有两个值,即导通状态下的  $+U_{dc}$  和关闭状态下的  $-U_{dc}$ ,根据式(10)~式(13),可计算得

$$U_L = 2Ri_a + (L_a + L_c) di_a/dt + (e_a - e_c) \quad (14)$$

$$(e_a - e_c) = U_L - 2Ri_a - (L_a + L_c) di_a/dt \quad (15)$$

在式(15)中,参数  $L_a+L_c$  可根据前述式(9)得到,从而可估计出 A 相和 C 相的相间反电动势

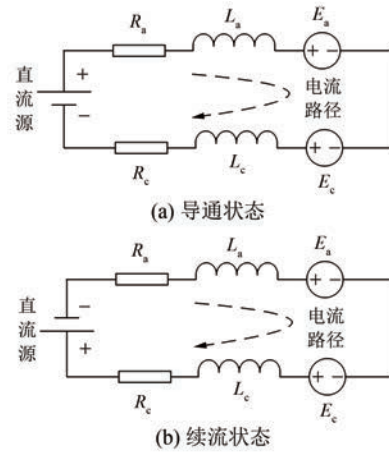


图 2 相间反电动势估计的等效电路

$e_a - e_c$ ,同理还可得到其他相间反电动势值。考虑到式(15)中含有微分量,为了避免定子电流测量含有的白噪声导致微分量引起反电动势估计的精度下降,对式(15)进行积分处理,以获取更为平滑的波形。具体表达式如下:

$$\int (e_a - e_c) dt = \int U_L dt - \int 2Ri_a dt - \int (L_a + L_c) (di_a/dt) dt \quad (16)$$

可以注意到,积分不是在整个电机运行中起作用,仅在导通时间中起作用,而反电动势的积分体现为对应的磁链  $\lambda_a - \lambda_c$ ,具体为

$$\lambda_a - \lambda_c = \int U_L dt - 2R \int i_a dt - (L_a + L_c) i_a + \lambda_0 \quad (17)$$

式中:  $\lambda_0$ ——相间磁链的初值。

在每一个采样间隔中,控制器对直流电压和相电流进行采样,并计算式(17)的离散积分式:

$$\lambda_a[n] - \lambda_c[n] = \sum_{n=1}^N 0.5(U_L[n-1] + U_L[n])\tau_{\text{samp}} - 2R \sum_{n=1}^N 0.5(i_a[n-1] + i_a[n])\tau_{\text{samp}} - (L_a + L_c) i_a[n] + \lambda_0 \quad (18)$$

式中:  $\tau_{\text{samp}}$ ——采样周期;

$N$ ——采样间隔内采样点数。

瞬时相间反电动势是瞬时磁链的导数,因积分不连续作用,仅在相关相导通期间作用,故  $\lambda_0$  未知。但是,只有磁链的斜率是需要用于控制计算的,所以  $\lambda_0$  是可以消除的,具体推导如下:

$$e_a(t) - e_c(t) = [\lambda_a(t) - \lambda_c(t) + \lambda_0] / \tau_{\text{samp}} - [\lambda_a(t - \tau_{\text{samp}}) - \lambda_c(t - \tau_{\text{samp}}) + \lambda_0] / \tau_{\text{samp}} \quad (19)$$

消除  $\lambda_0$  后,有:

$$e_a(t) - e_c(t) = [\lambda_a(t) - \lambda_c(t)] / \tau_{\text{samp}} - [\lambda_a(t - \tau_{\text{samp}}) - \lambda_c(t - \tau_{\text{samp}})] / \tau_{\text{samp}} \quad (20)$$

### 3 容错 BLDCM 控制器设计

BLDCM 的传统控制策略框图如图 3 所示。由图 3 可以看出每相电流注入的波形是一致的,而不同相的电流仅存在相位延迟,因而转子偏心导致的反电动势畸变和注入电流不匹配将导致电机转矩脉动的产生。尤其是对于低转动惯量的电机,还将导致电机转速的较大振荡。

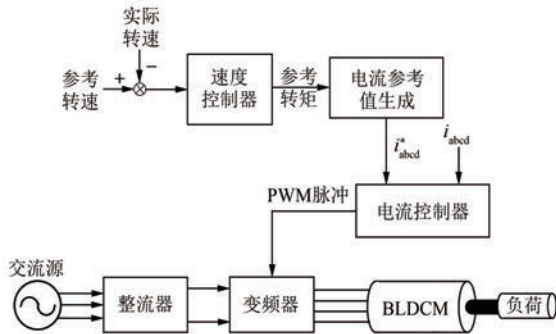


图 3 传统 BLDCM 控制框图

改进后的 BLDCM 控制策略框图如图 4 所示。考虑到本文试验对象为四相两对极 BLDCM,故控制框图是以该电机特征为依据进行绘制的。但本质上三相和四相 BLDCM 控制策略是一致的,区别在于三相电机定子绕组的电角度差是  $0^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $240^\circ$ ,而四相电机定子绕组的电角度差是  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$ 。为了减少转矩脉动,新型控制策略生成的参考输入电流必须考虑实际产生的反电动势波形。故电磁转矩的表示式为

$$T_e = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c + e_d i_d)}{\omega_m} \quad (21)$$

式中:  $\omega_m$ ——电机机械角速度。

假设 A 相和 C 相形成回路,则电磁转矩为

$$T_e = \frac{(e_a i_a + e_c i_c)}{\omega_m} \quad (22)$$

将式(13)代入式(22),可以得到:

$$T_e = \frac{i_a(e_a - e_c)}{\omega_m} \quad (23)$$

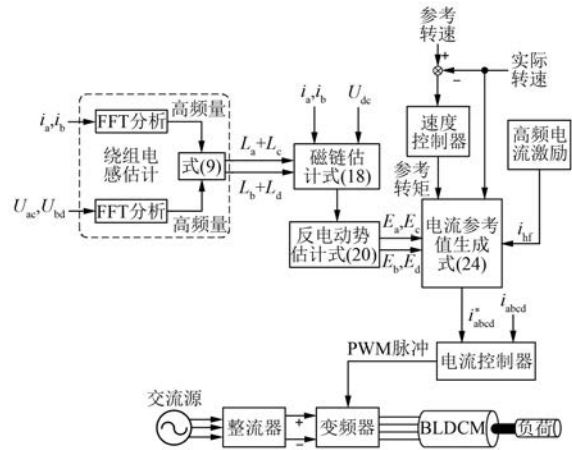


图 4 新型 BLDCM 容错控制框图

假设转速闭环生成的电磁参考转矩为  $T_e^*$ ,则计算得到电流参考  $i_a^*$  和  $i_c^*$  为

$$i_a^* = -i_c^* = \frac{\omega_m T_e^*}{e_a - e_c} \quad (24)$$

式(24)中,相间反电动势  $e_a - e_c$  的值可根据前述反电动势估计方法得到,而机械转速则可以通过速度传感器得到。因此,在每一个 A 相和 C 相导通时间间隔中,可以计算出对应相电流瞬时参考值。使用该方法,定子电流将根据反电动势的在线估计值实时调整大小,以应对偏心故障导致的反电动势波形畸变。由于定子绕组的中性点电位难以得到,因而这种方法的优点还体现在不需要得到电机单独一相的反电动势。新型容错控制方法的具体控制框图如图 4 所示。首先,速度 PI 控制器根据测量的实际转速和参考转速计算生成参考转矩值  $T_e^*$ ,同时对电机的导通绕组注入高频电流信号  $i_{\text{hf}}^*$ ,然后对电机端口测量得到的  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $u_{ac}$  和  $u_{bd}$  进行傅里叶分解和高频分量提取,然后实时计算出绕组电感  $L_a + L_c$  和  $L_b + L_d$ ,送入到相间反电动势观测器,估计出  $e_a - e_c$  和  $e_b - e_d$ ,接着结合前述参考转矩  $T_e^*$  和转速  $\omega_m$ ,由电流参考计算模块生成参考电流值  $i_a^*$ 、 $i_b^*$ 、 $i_c^*$  和  $i_d^*$ ,最后由电流控制器生成最终的 PWM 控制脉冲给到驱动变频器。

### 4 试验验证

为检验所提出的 BLDCM 在转子偏心时的故障容错控制方案,利用一个四相两对极的 BLDCM 和商用驱动变频器搭建小功率试验平台,控制器

采用 TI 公司的浮点运算芯片 F28335 结合 LEM 传感器和相关调理电路来实现算法功能。主要的试验系统参数和配置如表 1 所示。

表 1 试验系统主要相关参数

参数名称	参数值
电机额定功率/W	50
电机极对数	2
电机相数	4
电机额定转速/( $r \cdot \min^{-1}$ )	1600
电机相电阻参数/ $\Omega$	4
电机相电感参数/mH	6
注入高频电流频率/Hz	1 000
注入高频电流幅值/A	0.05

为了制造转子偏心故障,将电机轴承用较小尺寸的轴承替代,如图 5(a)所示。同时为了限制转子的运动,在定子中增加金属环,如图 5(b)所示,这样可以防止定转子间较大的摩擦损坏。同时还可以通过在轴承两侧增加垫片实现偏心幅度的调整。为了评估所提出控制策略减少转矩脉动的效果,在电机上施加了 30% 的偏心。

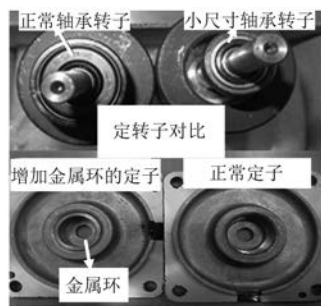
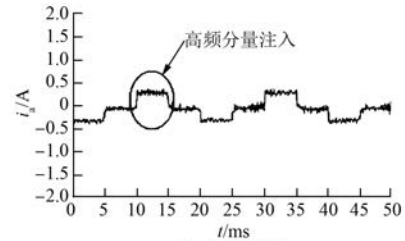


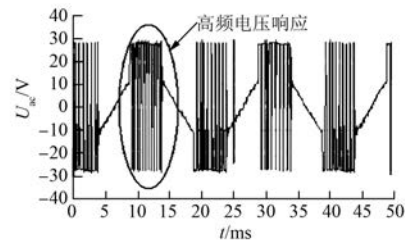
图 5 转子偏心故障实现

图 6(a)和图 6(b)所示分别为电机的 A 相电流和 AC 相线电压波形。从图 6(a)中可以看到电流含有注入的高频分量,幅值为 0.5 A,频率为 1 000 Hz,用于估计绕组电感。从图 6(b)中可以看出线电压波形中含有高频电流产生的高频电压响应。通过 FFT 分析,A 相和 C 相电感值之和为 13.5 mH,与铭牌参数相差 1.5 mH。同样的方法得到 B 相和 D 相电感值之和为 13.2 mH。之所以比额定参数大是因为偏心故障导致了气隙磁动势不均匀增加。

图 7 所示为偏心故障条件下电机的反电动势波形。为了清楚显示波形,将高频注入暂停了几个周波。可以从图 7 中看出,相间反电动势波形



(a) A相电流



(b) AC相线电压

图 6 高频注入后的 A 相电流和 AC 相线电压

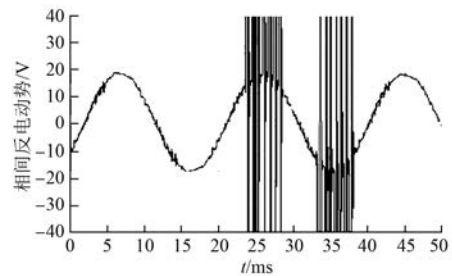


图 7 相间反电动势波形

由于偏心故障导致了畸变。图 8 和图 9 分别显示了传统控制方法与新型控制方法作用下的相电流和电磁转矩波形对比。可明显看出传统方法由于不考虑相电感和电机反电动势的变化,导致了电磁转矩的纹波脉动,而新型容错控制考虑了偏心引起的相关变化并反馈到了输出电流中,因而可以看到电磁转矩脉动明显减少。从图 8、图 9 还可以注意到容错控制注入的电流波形不再对称,正好对应了反电动势的不均匀增加。

为了评估所提出的控制策略的动态响应速度,将电机负载转矩从  $0.09 \text{ N} \cdot \text{m}$  增加到  $0.12 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,而不改变电机速度,得到如图 10 所示的电磁转矩波形。从图 10 可以看出,输出电磁转矩在 6 ms 左右即达到了参考转矩,从而验证了控制器的动态性能较好。

## 5 结 语

本文主要围绕一种 BLDCM 在转子偏心故障时的容错控制进行了研究,现总结出结论如下:

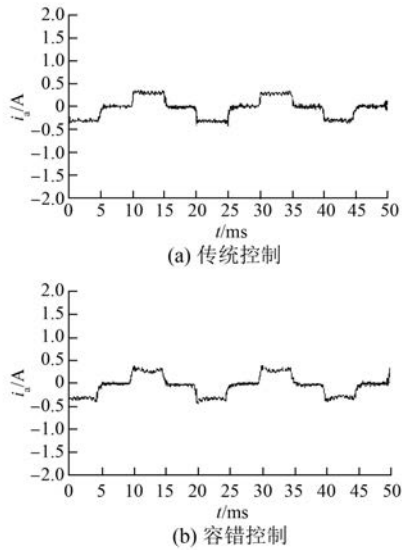


图8 相电流波形对比

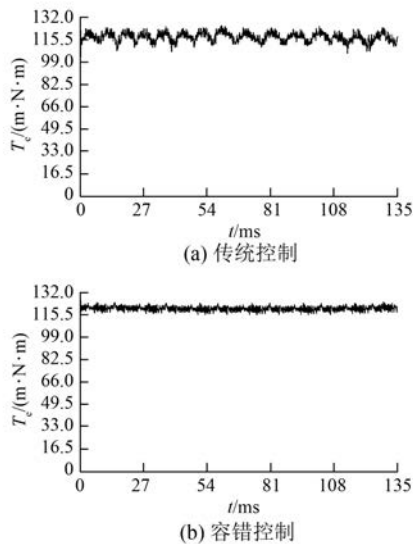


图9 电磁转矩波形对比

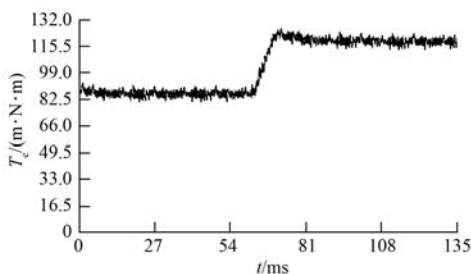


图10 负载转矩变化时的动态响应

(1) 转子偏心时 BLDCM 的气隙磁场发生不均匀改变,从而导致了电机反电动势波形的畸变。

这是产生电机转矩脉动的原因。

(2) 应用本文提出的容错控制算法,能够实时地估计出电机绕组相电感和反电动势,进而改变注入电流,使电磁转矩脉动得到降低。通过试验,验证其优于传统控制方法。

(3) 本文提出的容错控制策略主要是应对转子偏心故障,但仍可推广到其他非理想反电势导致 BLDCM 转矩脉动增加的情况。

### 【参考文献】

- [ 1 ] 宋哲.新型电动车用无刷直流电机回馈制动控制技术[J].电机与控制应用,2015,42(12): 79-84.
- [ 2 ] 谭亚,尹成科,谈雪丹,等.左心室辅助装置脉动载荷下无位置传感器无刷直流电机的速度控制[J].电机与控制应用,2015,42(6): 43-46.
- [ 3 ] 史婷娜,肖竹欣,肖有文,等.基于改进型滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制[J].中国电机工程学报,2015,35(8): 2043-2051.
- [ 4 ] 周晓华,李振强,刘胜永.无刷直流电机神经元变结构PID调速系统研究[J].电机与控制应用,2016,43(1): 12-16.
- [ 5 ] XIA C, XIAO Y, CHAN W, et al. Torque ripple reduction in brushless DC drives based on reference current optimization using integral variable structure control [ J ]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2014, 61(2): 738-752.
- [ 6 ] 姜卫东,胡杨,黄辉,等.采用坐标变换的无刷直流电机换相过程分析及减小换相转矩脉动的方法[J].中国电机工程学报,2015,35(24): 6527-6534.
- [ 7 ] 殷帅,吕彩琴,马铁华.抑制无刷直流电机换相转矩脉动的新型电流控制[J].电机与控制学报,2015,19(8): 47-52.
- [ 8 ] 陈华锋,宋辉,王占强.一种改进的无刷直流电机控制方法[J].电机与控制应用,2015,42(1): 28-35.
- [ 9 ] MIRIMANI S M, VAHEDI A, MARIGNETTI F, et al. Static eccentricity fault detection in single-stator-single-rotor axial-flux permanent magnet machines [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 1838-1845.
- [ 10 ] HONG J, LEE S B, KRAL C, et al. Detection of airgap eccentricity for permanent magnet synchronous motors based on the d-axis inductance [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2605-2612.
- [ 11 ] CAPPELLI L, COIA Y, MARIGNETTI F, et al.

- Analysis of eccentricity in permanent-magnet tubular machines [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2014, 61(5): 2208-2216.
- [12] EBRAHIMI B M, ROSHTKHARI M J, FAIZ J, et al. Advanced eccentricity fault recognition in permanent magnet synchronous motors using stator current signature analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2014, 61(4): 2041-2052.
- [13] 赵向阳, 王峥浩. 控制系统对无刷直流电机偏心故障的影响分析 [J]. 电机与控制应用, 2013, 40(3): 24-29.
- [14] 张菁菁, 王臻. 基于奇异值分解滤波的 Prony 技术在异步电机偏心故障检测中的研究 [J]. 电机与控制应用, 2016, 43(3): 83-88.
- [15] RAJAGOPALAN S, ROUX W, HARLEY R G, et al. Diagnosis of potential rotor faults in brushless DC machines [C] // IEEE 2nd International Conference on Power Electronics and Machine Drives, USA.: IEEE, 2004: 668-673.
- [16] ROUX W, HARKLEY R G, HABELTLER T G. Detecting rotor faults in low power permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1): 322-328.
- [17] 赵向阳, 葛文韬. 基于定子电流法监测无刷直流电动机转子动态偏心的故障模型仿真研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 124-130.
- [18] EBRAHIMI B M, FAIZ J. Diagnosis and performance analysis of three phase permanent magnet synchronous motor with static, dynamic and mixed eccentricity [J]. IET Electronics Power Application, 2010, 4(1): 53-66.

收稿日期: 2016-11-09

(上接第 101 页)

- [5] 赵敏. 光伏并网发电的最大功率点跟踪算法的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [6] BERES R, WANG X, BLAABJERG F, et al. A review of passive filters for grid-connected voltage source converters [C] // In Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE, 2014: 2208-2215.
- [7] CASTILLA M, MIRET J, MATAS J, et al. Linear current control scheme with series resonant harmonic compensator for single-phase grid-connected photovoltaic inverters [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2008, 55(7): 2724-2733.
- [8] VILLALVA M, GAZOLI J, FILHO E. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2009, 24(5): 1198-1208.
- [9] THOTTUVELIL V, CHIN D, VERGHESE G C. Hierarchical approaches to modeling high-power-factor AC-DC converters [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 1991, 6(2): 179-187.
- [10] 蔡晓峰. 基于输出电流的光伏发电系统最大功率点跟踪算法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [11] CHAVARRIA J, BIEL D, GUINJOAN F, et al. Energy-balance control of PV cascaded multilevel grid-connected inverters under level-shifted and phase-shifted PWMs [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2013, 60(1): 98-111.

收稿日期: 2016-09-20

(上接第 115 页)

- [10] MENDES V F, SOUSA C V D, SILVA S R, et al. Modeling and ride-through control of doubly fed induction generators during symmetrical voltage sags [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1161-1171.
- [11] MOHSENI M, MASOUM M A S, ISLAM S M. Low and high voltage ride-through of DFIG wind turbines using hybrid current controlled converters [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(20): 1456-1465.
- [12] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 25-31.
- [13] 杜宝星. 基于双馈感应发电机的风电系统故障穿越能力研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [14] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [15] 陈建军. 变速恒频双馈风电机组控制策略研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
- [16] 李进泽. 大兆瓦级双馈风力发电机关键技术 [R]. 北京: 中国南车株洲电机有限公司, 2012.
- [17] 孙华东, 张振宇, 林伟芳, 等. 2011 年西北电网风机脱网事故分析及启示 [J]. 电网技术, 2012, 36(10): 76-80.

收稿日期: 2016-05-08

## ABB 携手上海电气开拓海上风电市场

近日,ABB 和全球最大的海上风机整机制造商上海电气集团股份有限公司(“上海电气”)正式签署海上 4 MW 风机机组变流器年度框架协议,通过提供高效可靠的变流器产品,与上海电气携手开拓海上风电市场。这也是 2015 年以来 ABB 连续第三年和上海电气签署变流器供货协议。

上海电气是中国装备制造业最大的企业集团之一,为全球用户提供集大型风机设计、产品制造、技术咨询、工程总包为一体的风电解决方案。截至 2016 年年底,其海上风电机组装机量占全球海上装机容量的 58%。其中,4 MW 风机是上海电气供货产品中的主力机型,也是目前海上风电市场的热门机型。

作为上海电气的合作伙伴和供货商,ABB 开发出定制化的风电变流器 ACS880-87LC 用于配套上海电气的 4 MW 海上风机,助其进一步巩固在海上风电市场的领导地位。这款全功率液冷风机变流器设计紧凑且易于安装,可广泛适用于陆上和海上风电机。根据协议,ABB 还将向上海电气提供 2.5 MW 风机的变流器。

截止目前,ABB 已根据协议向上海电气交付了超过 300 套 4 MW 风电变流器,容量总和超过 120 万千瓦,应用于包括三峡响水、华能如东、国电投滨海、龙源南日岛一期、中水电如东、中广核如东等十余个海上风电项目中,携手推动我国绿色清洁能源资源的开发利用。

[ABB(中国)有限公司 供稿]

## 西门子推出 Simotics GP 1LE0 铝壳低压电机

西门子在中国研发并生产的 Simotics GP 1LE0 系列低压交流电机家族再添新成员——全新铝壳系列电机。全新 Simotics GP 1LE0 铝制外壳系列电机相比铸铁外壳电机,在保持结构强度和性能稳定的同时重量减轻可达 30%,在生产和回收的过程中能耗更低,碳排放更少。该系列电机具有绿色、精细、灵活、轻巧的特点,广泛适用于风机、泵、传送带等应用,以及纺织、食品饮料和电梯等轻工行业。

Simotics GP 1LE0 铝壳系列电机轴高为 80~132 mm,功率范围 0.55~7.5 kw,防护等级涵盖 IP55 和 IP56 两种选择,适合变频应用,可提供 IE2 和 IE3 两种效率等级系列,且外形尺寸完全一致。与铸铁外壳系列电机相比,铝制外壳系列电机表面质量更佳,相同的装配尺寸使用户更换电机时无需考虑设计因素。全新铝制外壳系列电机具有非常丰富的模块化设计,为用户带来多个功能选项和可选模块,例如,用户可以根据需要加

装制动器和编码器,也可以换装强冷风机,其独特的活动地脚设计,也让装配方式更加灵活。此外,该系列电机还采用一体化吊环设计,方便运输和安装维护。

150 年前,维尔纳·冯·西门子发现了实用发电机工作原理,并发明出可以将“大量机械能转换为电能,以用于电气照明、冶金工艺、动力传递等领域的发电机。”这项创新奠定了全球电气化的基础,为电机设备的问世创造了条件,也为工业领域大规模使用电机奠定了坚实基础。自那时起,西门子一直将电机研发和制造视为自己的核心业务之一。西门子凭借一百多年的宝贵经验,成为当之无愧的创新电机技术领先者,提供全球最全的电机产品线,且能够与驱动系统、控制系统、乃至生产的全生命周期完美集成,构成全集成驱动系统,帮助客户实现节能增效的绿色发展。

[西门子(中国)有限公司 供稿]



## Perkins 携众多明星产品参加第 16 届中国(上海)动力设备及发电机组展

5月4~6日举办的第16届中国(上海)动力设备及发电机组展已完美落幕,Perkins(珀金斯)发动机有限公司携众多明星产品再次参展,包括机性能不断提升、全面支持常用发电的Perkins® R4000系列发动机,为电信业提供迈向成功动力的Perkins® 400系列发动机,以及已通过中国非道路三阶段排放认证的Perkins® 2000系列发动机等。

据Perkins北亚洲区市场经理张嘉俊介绍,自Perkins 4000系列发动机面世以来,Perkins已为全球最大型企业制造超过5万台该系列发动机,其中30%是用来配装常用发电机组。Perkins 4000系列发动机不但结构坚固、耐用,其稳定性更能可保证客户时刻都有源源不断的电力供应。4000系列发动机初期广泛用作配套备用发电设备,随着Perkins多年来对此系列产品的持续优化工作,此系列现已深受原设备制造商和终端用户欢迎,已被视为常用发电设备的首选动力。

紧随全球电信行业的高速发展,Perkins扩大了旗下400系列发动机的阵容,增添了两个可变速发动机型号,排量分别是1.5升和2.2升,同时延长了产品的维护间隔,使整个产品组合更趋完善。这些发动机可以帮助电信服务经营者节省拥有和操作成本,还具有极低油耗和很高耐久性,可在任何地区操作。全球各地的监管者都要求电信业尽量减少他们的营运对环境的影响。Perkins支持这些长远目标,因此致力提供混合发电方案,该等方案不但适用于只配备电池的混合发电机组,也可支持采用电池和太阳能结合运行的机组。这些方案都可直接帮助客户无论在什么地区经营,都能够符合当地的法规。Perkins亚太区销售及分销总监毕澹宁(Daniel Bentley)表示:“Perkins拥有完整的产品阵容、丰富的专业经验和可靠的全球产品支持网络。无论电信商是落户世界哪个角落,Perkins都是他们的理想合作

伙伴。”

此次展会上,Perkins还展示了广受欢迎的2000系列发动机,Perkins 2000系列包含多个6缸、空气对空气涡轮增压柴油机型号,配备机械式驱动单体喷油器,结合先进电子控制及精心匹配的涡轮增压器,以助最大化燃油经济性。此系列备有多个型号,功率覆盖广泛,其中13升排量的2206D-E13TAG3™型号和15升排量的2506D-E15TAG2™型号都已经认证符合中国非道路三阶段排放标准。另外,18升排量的2806D-E18TAG1A™型号也即将完成认证程序。毕澹宁表示:“2000系列顺利通过中国非道路三阶段排放认证,充分说明Perkins通过不断提升发动机产品的操作效率,竭尽全力履行促进可持续发展环境的承诺,同时确保未来好几代人都可享受无污染、美好的生活。”

张嘉俊还介绍说,Perkins产品在中国的市场占有率已有相当高的优势,在保持优势占有率的同时,Perkins特别为落户在中国及更广泛亚太地区的Perkins发动机设计了多项崭新服务和支撑解决方案,包括Perkins特别研制的一种全新柴油机机油Perkins Diesel Engine Oil (DEO)、再造及替换发动机解决方案,以及Perkins最新推出的白金级保修计划等。DEO机油由12种添加剂混合而成,所采用的独特配方,可以消除那些可能削弱机油功效,缩短发动机操作寿命及损坏零部件的不利状况。Perkins推出的白金级产品保修计划中,一些特定型号发动机的保障期可达十年或15 000小时(累计工作时间)。保修期内,发动机的全部零部件都可享有免费维修和更换。

张嘉俊最后还表示,未来南美会是Perkins关注的市场,但中国市场依然是Perkins的重点市场,Perkins会持续想中国客户所想,为中国客户提供最优质的服务。

[Perkins(珀金斯)发动机有限公司 供稿]

# 《电机与控制应用》合订本征订



《电机与控制应用》是上海电器科学研究所（集团）有限公司主办的全国中文核心期刊。上海电器科学研究所始建于1953年，是中国最大的多领域、综合性电工产品研究开发机构，上海市高新技术企业。电科所在电工行业内，从技术、检测、标准及人才优势等方面都具有举足轻重的地位，国内外对其关注程度都相当高。

《电机与控制应用》创刊于1959年，是经国家新闻出版总署批准注册，由上海电器科学研究所（集团）有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。每月10日出版，国内外公开发售，邮发代号4-199。在近半个世纪的岁月中，该杂志为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献，在中国电机及其应用领域享有很高的影响。

名称	价格（元/套）
2008年《电机与控制应用》合订本	200
2009年《电机与控制应用》合订本	200
2010年《电机与控制应用》合订本	200
2013年《电机与控制应用》合订本	200
2014年《电机与控制应用》合订本	200
2015年《电机与控制应用》杂志全年散本	144
2016年《电机与控制应用》杂志全年散本	144

## 订阅方式

### 1、编辑部订阅：

邮局汇款：（200063）上海市普陀区武宁路509号17楼  
《电机与控制应用》编辑部

### 2、邮局订阅：具体咨询当地邮局，邮发代号4-199。

### 3、网上订刊渠道：我得杂志网 (<http://www.myzazhi.cn>) 蜘蛛网 (<http://www.spider.com.cn>) 电子版购买可登陆读览天下网 (<http://emca.dooland.com>)

### 4、海外读者订阅：可致电中国国际图书贸易集团有限公司

亚洲地区订刊电话010-68433109 欧美地区订刊电话010-68433119

### 联系方式：

期刊：《电机与控制应用》编辑部 地址：上海市普陀区武宁路509号17楼（200063）

电话：021-62574990-221、745 传真：021-32230809

网站：<http://motor-abc.chinaelc.cn> 电子邮箱：[emca@seari.com.cn](mailto:emca@seari.com.cn)