

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.016

永磁同步电机无位置传感器带速启动研究

姜真军, 章 玮*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对无位置传感器永磁同步电机在带速状态下无法可靠启动的问题,通过向逆变器施加两个短时零电压矢量的方式,使电机定子三相绕组短路,根据短路电流相量在 $\alpha\beta$ 坐标系下的角度变化,辨识出电机转向和转速,通过对短路电流在 dq 坐标系下暂态过程的解析分析,估算出电机转子位置,给出了暂态过程中短路电流幅值大小与初始转速和短路时间之间的关系,提出了具体的带速启动实现方案。在TI公司的TMS320F28027作为主控芯片的驱动系统以及带风机负载的550 W永磁同步电机组成的实验平台上对带速启动方案进行了评价,进行永磁同步电机在不同转速和短路时间情况下的带速启动实验。研究表明:设计的带速启动方案能够准确的根据短路电流判断出电机启动瞬间的转向、转速和转子位置,从而保证了永磁同步电机在带速状态下的可靠启动。

关键词:无位置传感器;永磁同步电机;带速启动

中图分类号:TH39;TM341

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0896-05

Start method for PMSM without position sensor in rotating conditions

JIANG Zhen-jun, ZHANG Wei

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the matter that permanent magnet synchronous machine (PMSM) with no position sensor cannot start reliably in rotating conditions, two zero-vectors were applied to inverter to make three phase stator windings of the machine had a short-circuit. Through analyzing the angle variation of the currents in $\alpha\beta$ coordinates, the rotational direction and speed of the machine were derived. Furthermore, through analyzing the transient state process of the currents in dq coordinates, the rotor position of the machine was estimated, the relationship between the initial speed, the duration of short-circuit and the amplitude of short-circuit current was put out, a start method for PMSM in rotating conditions was offered specifically. The start method mentioned above was evaluated on the experimental platform, which TMS320F28027 provided by TI was used as the master of the whole control system, and a fan was used as the load of PMSM, whose rated power is 550W, the start method was tested under different initial speed and duration of short-circuit conditions. The experimental results show that according to short-circuit currents, the start method designed, can estimate the rotation direction, initial speed and rotor position precisely, thus reliable start of PMSM in rotating conditions can be achieved.

Key words: without position sensor; permanent magnet synchronous machine(PMSM); start in rotating conditions

0 引 言

永磁同步电机具有体积小、功率密度高、效率高、结构简单、噪音低以及动态响应快等优点,目前已成为工业生产中一种理想的电机^[1]。无位置传感器控制是目前永磁同步电机控制的研究热点^[2-5]。随着应用

领域的扩大,在诸如风机、水泵等应用场合下,电机的初始状态受到外界环境的影响可能处于带速状态。由于永磁同步电机转子为恒定永磁体,若电机带速,则会在定子绕组中产生正比于转子转速的反电动势,盲目切入控制系统不仅不能保证电机正常启动,严重的可能会产生过流等后果。因此电机初始状态未知情况下

收稿日期:2016-12-06

作者简介:姜真军(1990-),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事无位置传感器永磁同步电机控制策略方面的研究。E-mail: jzj369@zju.edu.cn

通信联系人:章玮,女,副教授,硕士生导师。E-mail: weizhang@zju.edu.cn

永磁同步电机可靠启动问题需要进行深入地研究。

针对永磁同步电机无位置传感器的带速启动,目前常用的方法是通过硬件引出电机的反电动势,通过对反电动势分析得到电机启动时的转速、转向以及转子位置。为了精简系统,文献[6]以绕组电流为基础,提出采用两次短路法,通过对绕组电流的分析,获得转子的初始位置,但是该方法在估算转子位置的时候,由于大量使用了电机的电感参数以及电流的采样值,并直接引用了估算得到的电机转子角速度,估算的转子角度可能存在较大误差;文献[7]为了避免判断失误,利用三次短路电流法,减小短路间隔时间的影响,但是使操作步骤和计算过程复杂化;文献[8-9]进一步通过分析短路电流相量在 dq 坐标系中的角度计算公式,构建函数曲线,简化了转子角度计算过程。以上方法都没有给出电机转向判定的具体方法,对电机转子位置的初始状态停留在数学推导层面,没有给出具体的物理过程分析。

本研究在对上述文献研究的基础上,通过分析两次三相定子绕组相间短路电流相量在 $\alpha\beta$ 坐标系下的相位变化判定电机转向,对电机短路瞬间的物理过程进行严格的解析推导,揭示短路时间、短路间隔、启动前转速等与电机参数的关系。

1 两次短路法的电流解析分析

永磁同步电机控制系统框图如图 1 所示。

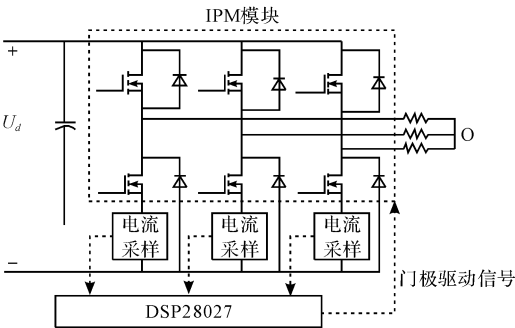


图 1 永磁同步电机系统框图

系统中不含位置传感器和电压传感器,通过分析采样电流,通过适当的算法实现位置和转速的观测。

1.1 转子初始速度和转向检测

在电机控制投入前,向电机施加零电压矢量,即短暂闭合三相桥的下桥臂(或上桥臂)。在电机带速状态下会出现瞬时的三相短路电流。在静止两相 $\alpha\beta$ 坐标系中,该短路电流相量与 α 轴夹角为:

$$\theta_I = \arctan\left(\frac{i_\beta}{i_\alpha}\right) \tag{1}$$

电机正转时,施加间隔 τ 的两次零电压矢量时短路电流相量的空间位置如图 2 所示。

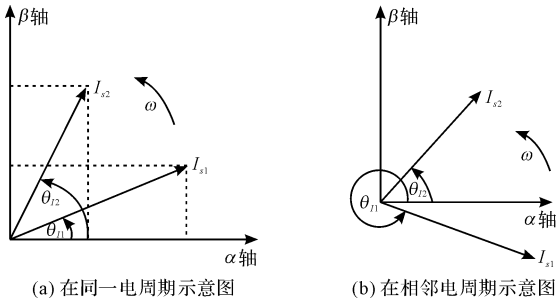


图 2 两次短路电流的空间位置示意图

θ_{n1} 、 θ_{n2} 分别对应了两次短路电流相量和 α 轴的夹角。其中 θ_{n1} 、 θ_{n2} 分别为第一次和第二次短路电流相量与 α 轴夹角,图 2(a) 中两次短路电流在同一个电周期内,图 2(b) 中两次短路电流在相邻两个电周期内。当 τ 足够小时,转子角速度可近似认为是恒定值。为了能够有效辨别电机的转向,两次短路电流相量之间的夹角应满足:

$$|\theta_{n2} - \theta_{n1}| < \pi \tag{2}$$

由获得的 θ_{n1} 、 θ_{n2} ,可求出具体的电机转速、转向,如表 1 所示。

表 1 电机转速和转向与 θ_{n1} 、 θ_{n2} 关系	
$\theta_2 - \theta_1/\text{rad}$	转速 $\omega_e/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
$0 < \theta_{12} - \theta_{11} < \pi$	$\omega_e = \frac{\theta_{12} - \theta_{11}}{T_{sh} + \tau} > 0$
$\theta_{12} - \theta_{11} < -\pi$	$\omega_e = \frac{\theta_{12} - \theta_{11} + 2\pi}{T_{sh} + \tau} > 0$
$-\pi < \theta_{12} - \theta_{11} < 0$	$\omega_e = \frac{\theta_{12} - \theta_{11}}{T_{sh} + \tau} < 0$
$\theta_{12} - \theta_{11} > \pi$	$\omega_e = \frac{\theta_{12} - \theta_{11} - 2\pi}{T_{sh} + \tau} < 0$

由上述分析可知,短路时间 T_{sh} 和短路间隔 τ 的选择是速度估算的关键。短路时间 T_{sh} 过短不足以产生有效的可观测电流,产生估算误差;过长则会使转子速度产生明显的波动,并且有产生过电流。由表 1 可知,估算的误差主要是分子 $\theta_{n2} - \theta_{n1}$,分母越大,产生的相对误差越小,短路间隔 τ 的选择应在满足式(2)的条件下尽可能大,时间 τ 应按电机额定频率时满足式(2)的条件整定。

1.2 转子初始位置检测

电机带速状态下,定子绕组三相短路时,短路电流可以表示为^[10-12]:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = -I_{m\sim} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} + I_{mz} \begin{bmatrix} \cos\theta_0 e^{-\frac{T_{sh}}{T_a}} \\ -\cos\left(\theta_0 - \frac{2}{3}\pi\right) e^{-\frac{T_{sh}}{T_a}} \\ \cos\left(\theta_0 + \frac{2}{3}\pi\right) e^{-\frac{T_{sh}}{T_a}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: θ_0 —施加零电压矢量瞬间转子位置角; θ —转子在 T_{sh} 时刻的位置角, $\theta = \theta_0 + \omega_e T_{sh}$; T_a —直流分量衰减时间常数; $I_{m\sim}$ —短路电流基频分量幅值; I_{mz} —直流分量幅值。

对于表贴式永磁同步电机, $I_{m\sim}$ 、 I_{mz} 满足如下关系:

$$I_{m\sim} = I_{mz} = \frac{E_m}{X_d} \quad (4)$$

式中: E_m —反电动势幅值, X_d —定子绕组 d 轴电抗。

式(3)中, A 相直流分量利用三角函数和差化积公式:

$$I_{Az} = I_{mz} \cos(\theta - \omega_e T_{sh}) = I_{mz} \cos\theta \cos\omega_e T_{sh} + I_{mz} \sin\theta \sin\omega_e T_{sh} \quad (5)$$

若短路时间 T_{sh} 足够短, $\omega_e T_{sh}$ 趋近 0, 可做如下化简:

$$\begin{cases} \cos\omega_e T_{sh} \approx 1 \\ \sin\omega_e T_{sh} \approx \omega_e T_{sh} \end{cases} \quad (6)$$

A 相相电流:

$$\begin{aligned} I_A &= -I_{m\sim} \cos\theta + I_{mz} \cos\theta \cos\omega_e T_{sh} + I_{mz} \sin\theta \sin\omega_e T_{sh} = \\ &= -I_{m\sim} \cos\theta + I_{mz} \cos\theta + I_{mz} \omega_e T_{sh} \sin\theta = \\ &= I_{mz} \omega_e T_{sh} \sin\theta \end{aligned} \quad (7)$$

B 、 C 相相电流同理可以求得。从三相静止坐标系变换到同步旋转坐标系:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} I_{mz} \omega_e T_{sh} = \begin{bmatrix} 0 \\ -I_{mz} \omega_e T_{sh} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可知, 若 $\omega_e T_{sh}$ 趋于 0, i_d 在起始定子绕组三相相间短路时间内可近似为 0, i_q 可看作是短路时间 T_{sh} 的线性函数。因此, 若电机正转, $\omega_e > 0$, 短路电流相量在空间的初始相位与 q 轴负方向重合, 若电机反转, $\omega_e < 0$, 则短路电流相量在空间的起始位置和 q 轴

正方向重合。

电机正转时短路电流空间位置如图 3 所示。

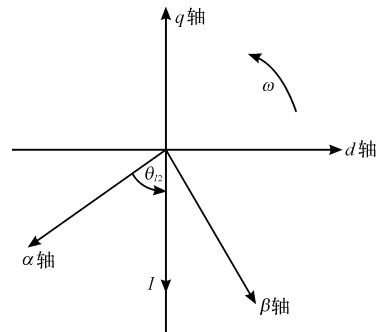


图 3 电机正转时短路电流空间位置

由式(4)可知, 定子绕组三相短路电流幅值取决于反电动势的幅值, 即转速大小, 故可根据电流上升的快慢动态的决定 T_{sh} 取值, 以使 $\omega_e T_{sh}$ 满足趋近 0 的条件。因此, 在 $\omega_e T_{sh}$ 足够小的情况下, 电机转子位置角为:

$$\begin{cases} \theta_e = \theta_{12} + \frac{\pi}{2} (\omega_e > 0) \\ \theta_e = \theta_{12} - \frac{\pi}{2} (\omega_e < 0) \end{cases} \quad (9)$$

1.3 具体实现步骤

基于以上理论推导, 结合实验所用三相风机实验平台, 具体实施步骤如下:

(1) 电机启动前逆变器三相桥臂全关断, 设定最大电流阈值 $I_{\max}$ 和最小电流阈值 $I_{\min}$;

(2) 施加第一个零电压矢量, 实时计算电流幅值 I_m 。若在固定时间 T 内 $I_m < I_{\min}$, 即认为电机静止, 切入静止启动程序; 若在固定时间 T 内, $I_{\min} \leq I_m < I_{\max}$, 则以固定时间 T 作为 T_{sh} , 计算 θ_{12} 的值; 若在固定时间 T 内某一时刻 $I_m \geq I_{\max}$, 则记录该时刻时间为 T_{sh} , 计算 θ_{12} 的值;

(3) 逆变器三相桥臂全部关断, 时长为 τ ;

(4) 施加第二个零电压矢量, 作用时间为 T_{sh} , 计算 θ_{12} 的值, 并根据表 1 和式(9) 确定电机转向、转速和转子位置, 切入带速启动程序。

2 实验及结果分析

为了验证上述方法的有效性, 在一台三相永磁同步电机带风机负载的实验平台进行了实验验证, 额定功率为 550 W, 额定转速为 2 200 r/min, 5 对极, 定子每相绕组电阻、电感分别为 3 Ω 、28.7 mH。控制器的主控芯片为 TMS320F28027, 逆变器开关频率为 15 kHz。实验平台如图 4 所示。



图4 实验平台

模拟电机顺风启动的实验波形如图5所示。

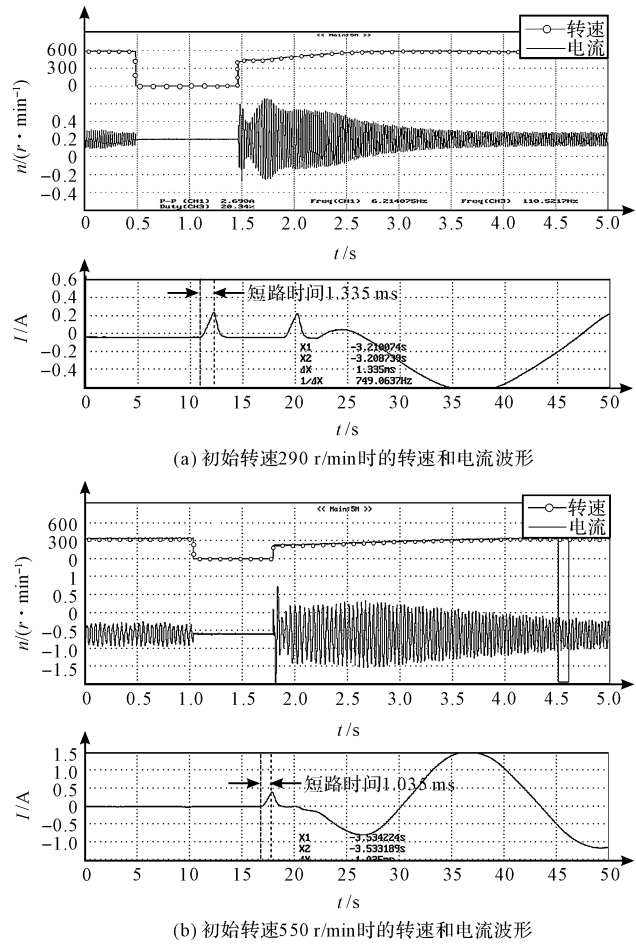


图5 投入控制系统前电机正转实验波形

实验中正常运行段的转子位置和转速观测由滑模观测器、锁相环配合完成,系统构架为转速、电流双闭环。图5(a)中电机初始运行速度为300 r/min,停机约0.8 s后,电机的转速仍保持约为290 r/min。经加速后转速再次稳定到300 r/min,零电压矢量作用时间约为1.335 ms。图5(b)中电机初始运行速度为600 r/min,由于电机带风机负载,负载转矩与速度的平方成正比,电机转速跌落较300 r/min时较为剧烈,停机约1 s后,电机转速约为550 r/min,经加速后转速

再次稳定到600 r/min,零电压矢量作用时间约为1 ms。从图5中可以看出在控制策略切入时,定子绕组的冲击电流较小,转速波动较小。

本研究给定零电压矢量施加时间 T_{sh} , T_{PWM} 为 PWM 周期,初始转速均为约550 r/min 如图6所示。

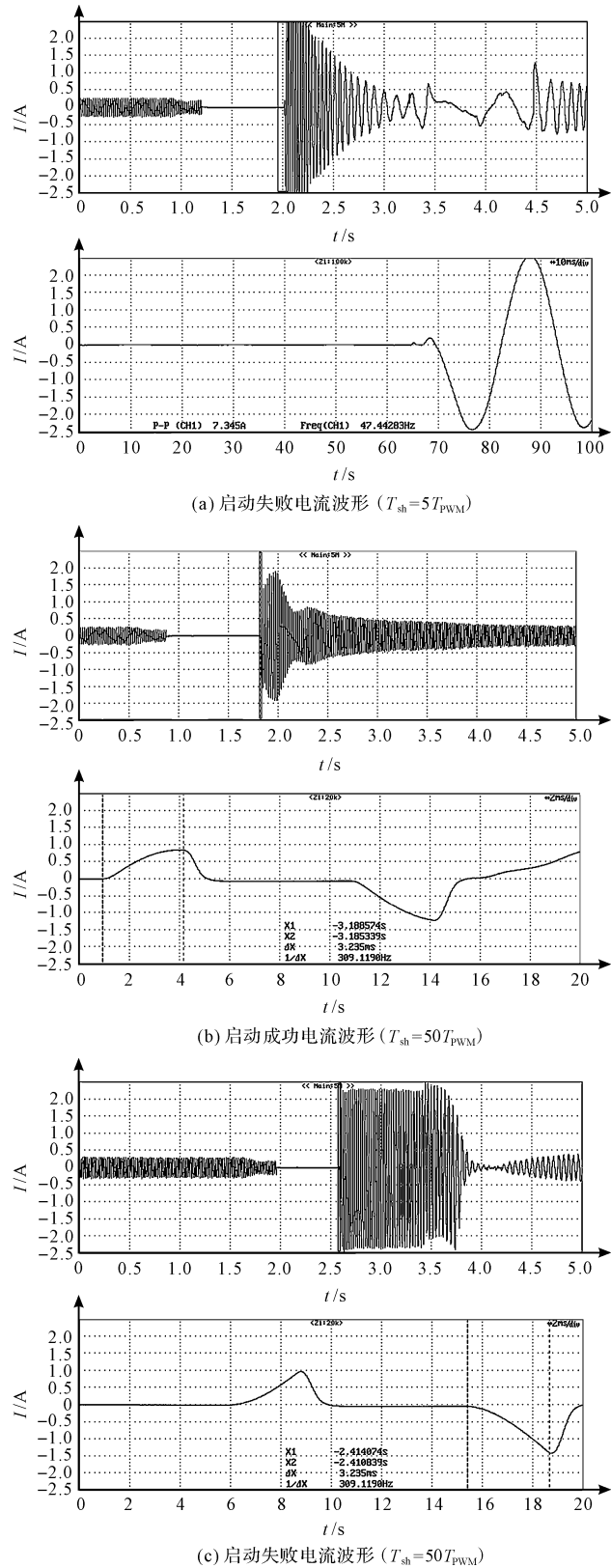


图6 正转给定零电压矢量作用时间电流波形

图 6(a) 中 T_{sh} 为 5 个 PWM 周期 (约 0.3/ms), 电流很小, 由于 ADC 精度原因, 判断失误, 电机失步。图 6(b)、6(c) 中 T_{sh} 均为 50 个 PWM 周期 (约 3.3/ms), 经实验反复验证, 偶尔出现启动失败的情况, 图 6(b) 中启动电流稍大于图 5(b), 图 6(c) 中电机失步。由此可以得出结论, 零电压矢量作用时间不宜过短, 应在保证采样电流精度的前提下, 尽量缩短零电压矢量作用时间, 具体时间可根据电机参数和用于电流采样的 AD 精度整定, 在短路电流允许前提下可适当放宽 T_{sh} 。模拟电机逆风启动的实验波形如图 7 所示。

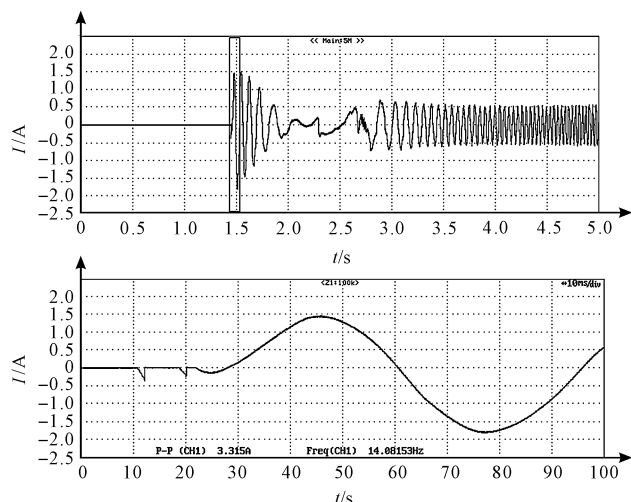


图 7 投入控制系统前电机反转电流波形

风机反向旋转状态下切入控制系统。在逆风启动时, 通过两次短路电流的检测, 判断得到电机反转的速度和转子位置, 通过控制策略对电机进行减速, 然后顺向旋转。从图中可以看出, 电机定子绕组电流没有产生明显的冲击电流, 整个过程平滑运行。

3 结束语

本研究提出的基于两次短路法的带速启动控制策略, 通过分析 $\alpha\beta$ 坐标系下两次短路电流相量的位置变化和 dq 坐标系下暂态过程中 dq 轴电流分量之间的数值关系, 确定电机的旋转方向、转速和转子位置, 针对不同的永磁同步电机, 只需要根据电磁时间常数和负载情况, 合理地选择适当的零电压矢量作用时间和短路间隔时间即可, 不依赖电机具体参数, 具有较强的实用价值。所提控制策略可以满足永磁同步电机在无

位置传感器条件下的带速启动可靠性要求, 能够保证电机在投入控制系统之后转矩和电流的稳定性要求。

实验结果验证了所提控制策略的有效性和可靠性, 电机在带速情况下可以平滑切入控制系统。

参考文献 (References):

- [1] 张幸浩, 章 玮. 一种基于功率观测的永磁同步电机高效 V/f 控制[J]. 机电工程, 2015, 32(4): 516-520, 530.
- [2] 毛永乐, 杨家强, 赵寿华, 等. 带负载转矩估算的非线性观测器内嵌式永磁同步电机无位置传感器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2252-2259.
- [3] 李雪恺, 陈 勇, 张鑫彬, 等. 自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 兵工自动化, 2016, 35(9): 73-77.
- [4] 李 洁, 周 波, 刘 兵, 等. 表贴式永磁同步电机无位置传感器启动新方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2513-2520.
- [5] 王高林, 张国强, 贵献国, 等. 永磁同步电机无位置传感器混合控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 103-109, 17.
- [6] TANIGUCHI S, YAMAKAWA T, et al. Starting procedure of rotational sensorless PMSM in the rotating condition[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(1): 194-202.
- [7] KONDO K. Re-starting technologies for rotational sensorless controlled AC machines at the rotating status[C]. Control Conference (ASCC), Kota kinabalu: IEEE, 2015.
- [8] LEE K, LUKIC S, AHMED S. A universal restart strategy for permanent magnet synchronous machine[C]. Energy Conversion Congress and Exposition, Montreal: IEEE, 2015.
- [9] LEE K, AHMED S, LUKIC S M. Universal restart strategy for high-inertia scalar-controlled PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 4001-4009.
- [10] 王北社, 田德见. 永磁同步发电机三相突然短路过渡过程的分析[J]. 东方电气评论, 2015, 29(1): 36-39.
- [11] 张宏波, 张治平, 王 开, 等. 高效永磁同步变频离心式冰苔冷双工况机组的研制[J]. 流体机械, 2016, 44(10): 65-69.
- [12] 陈玉枫. 新型免疫克隆算法在永磁无刷直流电机系统中的应用[J]. 轻工机械, 2015, 33(3): 62-65.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

姜真军, 章 玮. 永磁同步电机无位置传感器带速启动研究[J]. 机电工程, 2017, 34(8): 896-900.

JIANG Zhen-jun, ZHANG Wei. Start method for PMSM without position sensor in rotating conditions[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(8): 896-900.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>