

基于特征位置磁链开关磁阻电机无位置传感器技术

张磊 刘闯 管旻珺 王云林

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

摘要:提出了一种基于特征位置磁链的改进型简化磁链开关磁阻电机无位置传感器技术。与传统简化磁链方法相比,该方法容易实现换相和电机双拍运行,针对 12/8 结构开关磁阻电机电感与位置关系,选取 7.5° 和 15° 作为特征位置,并利用实时磁链与特征位置磁链比较获取三相位置信号。为了提高处理器精度,本文只比较一个特征位置,而另一个特征位置由延迟得到。建立以 dsPACE 为核心的磁链实测和位置估计的模型,详细分析了 7.5° 和 15° 两个特征参考位置对位置估计精度的不同,得出在低速和空载情况下,以 15° 特征位置磁链为基准估计出来的位置信号比以 7.5° 特征位置磁链为基准估计出来的位置信号精度要高。最后,通过实验验证了所提方法的正确性和可行性。

关键词:开关磁阻电机;无位置检测;改进型简化磁链;特征位置

中图分类号: TM352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2013)05-0671-06

Sensorless Research on Switched Reluctance Motor Based on Special Position Simplified Flux Method

Zhang Lei, Liu Chuang, Guan Minjun, Wang Yunlin

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A novel improved simplified flux-current method for sensorless of switched reluctance motor (SRM) is proposed based on the flux-linkage data points of feature rotor position. Compared with the conventional methods, the proposed method is easy to implement the phase commutation and the two-phase working. Considering the relationship of the inductance and the rotor position for the 12/8 SRM, the positions of 7.5° and 15° are selected as the feature positions, and the three-phase position signals are acquired with comparison of the real-time flux and the feature position flux. In order to improve the accuracy of CPU, only one feature position is compared, while another feature position is obtained by time delay. The experimental platform based on dsPACE of SRM sensorless control system is built. The influence of the two different feature position points on the estimated position is analyzed. The result shows that under the condition of low speed and no load, the accuracy of estimated position signal based on the feature position of 15° is higher than that based on the feature position of 7.5° . Finally, the experiment verifies the feasibility and validity of the proposed method.

Key words: switched reluctance motor(SRM); sensorless; improved simplified flux linkage; special position

开关磁阻电机(Switched reluctance motor, SRM)为双凸极定转子结构,转子没有线圈,结构

简单坚固、成本低、适应高温、高速及恶劣环境等优点,但 SRM 需要位置传感器来确定转子的位置信

基金项目:国家自然科学基金(51377076)资助项目;江苏省“六大人才高峰”(50977044)资助项目。

收稿日期: 2012-10-15; **修订日期:** 2013-05-28

通信作者: 刘闯,男,教授,博士生导师, E-mail: lc@nuaa.edu.cn。

号,这既增加了系统的成本也增加了系统的复杂程度和系统的可靠性,同时也不适应在潮湿、振动、多尘等恶劣环境场合。所以,探索利用 SRM 的某些电气参数来解算或估算转子位置的方法便成为国内外学术界研究的重点课题。

经过各国学者多年的研究,目前 SRM 无传感器技术主要有脉冲注入法、电感模型法、磁链电流法、模型观测器法等。文献[1~4]在低速工作区采用高频脉冲注入法间接检测转子位置信号,此方法简单,易实现,但产生负转矩,且只能实现单拍起动,所以降低了起动效果。文献[5,6]采用电感模型方法实现位置估计信号检测,但忽略了电机互感的影响,如果电机各相处在不平衡运行状况下,互感是不能忽略的。文献[7~10]采用了状态观测器方法实现间接转子位置的估计,通过检测电机的相电压和相电流,根据构建的状态空间模型,估算转子位置,其系统结构复杂,对微处理器要求很高。

文献[11~16]采用磁链的方法检测位置信号。其中文献[11~13]利用磁链-电流-转子位置之间的关系,建立三维数据表,通过查表获取位置信号。文献[14]在文献[11~13]的基础上对磁链方法进行了简化,选定最大位置附近作换相时刻的参考磁链,通过实时计算磁链与此位置的磁链比较而得到换相位置,该方法只需要二维数据表,算法简单,但最大位置附近的换相位置不好确定。文献[15]在文献[14]的基础上把能量优化开关角与简化磁链的方法相结合,但也存在换相位置的不好确定问题。文献[16]提出了任意给定开通角且与关断角无关的改进型磁链法,有利于在进行无位置传感器控制的同时实现效率优化和转矩脉动最小化等要求。

本文在文献[14~16]基础上对简化磁链方法进一步改进,针对 12/8 结构三相开关磁阻电机,提出以 7.5° 或 15° 为特征参考位置的改进型简化磁链位置估计策略,并分别以这两个特征位置估计出来的位置进行比较,分析了特征位置的不同所带来的位置估计精度不同的原因。

1 改进型简化磁链位置估计原理

1.1 改进型简化磁链方法

图 1 为 12/8 结构三相开关磁阻电机的位置信号与三相电感关系的示意图。由图中可看出, A 相电感的 7.5° 和 15° 位置分别对应 C 相位置信号的下降沿与 B 相位置信号的上升沿;同理, B 相电感的 7.5° 和 15° 位置分别对应 A 相位置信号的下

降沿与 C 相位置信号的上升沿, C 相电感的 7.5° 与 15° 位置分别对应 B 相位置信号的下降沿与 A 相位置信号的上升沿。

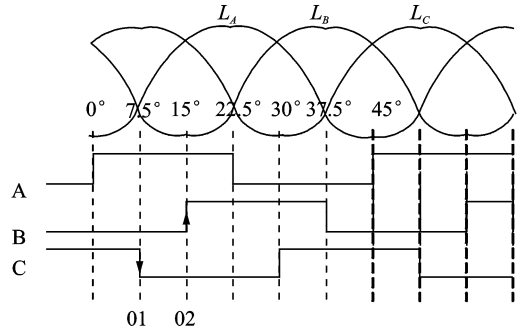


图 1 12/8 SRM 位置信号与电感曲线

文献[14,15]简化磁链方法存储的是最大位置附近的磁链-电流关系数据,通常选定的换相位置和最大位置之间是 $k(0.7 < k < 1)$ 倍系数关系。而本文是测量并存储 SRM 的 7.5° 和 15° 特征位置的磁链-电流,组成二维数据表,将实时积分计算得到的磁链与这两个特征位置的磁链比较来判断位置信号的边沿时刻。图 2 是三相 12/8 结构 SRM 磁化曲线族,由图看出特征位置 7.5° 与 15° 的磁链-电流曲线密度小于最大电感位置 (22.5°) 的磁链-电流曲线密度。因此,该改进型简化磁链位置估计方法比简化磁链法更为准确可靠。

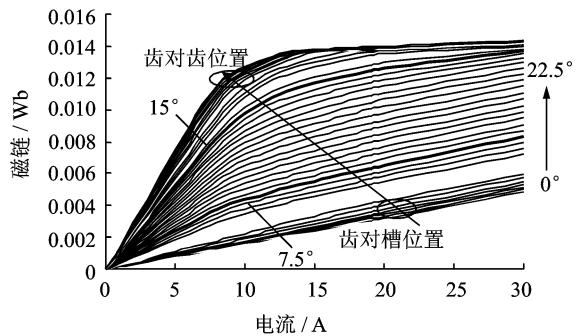


图 2 12/8 结构 SRM 磁化曲线族

但改进型简化磁链位置估计方法需要建立 7.5° 和 15° 的磁链二维表,这增加微处理器的负担,降低了位置估算的精度。为此,本文更进一步简化了改进型简化磁链方法,提出以特征位置 7.5° 和 15° 中一个角度磁链-电流为基准的改进型简化磁链位置估计方法,而另一个特征位置利用电机的实时速度延时得到,这样只需要建立一个二维数据表,降低了因查表而带来位置估计误差,更进一步提高了位置估计的精度。

1.2 以 7.5°为特征参考位置的位置估计

利用机械分度头测量 7.5°磁链 - 电流特性,建立二维数据表存储内存,以电机 A 相绕组为例,在电机运行过程中,实时采集 A 相电压、电流,通过积分运算得到电机的瞬时磁链值。将实时计算的磁链值通过查表与内存存储的 7.5°位置的磁链进行比较,如果实时计算的磁链等于同电流条件下的 7.5°位置实测磁链时,C 相位置信号将产生一个下降沿,即关断 C 相;而 B 相位置信号上升沿时刻是将 C 相的下降沿时刻延时 7.5°得到。延时是通过实时的转速计算得到;同理,B 相和 C 相也通过判断 7.5°位置处的磁链和延时得到相应相位置信号的上升沿与下降沿,其原理框图如图 3 所示。

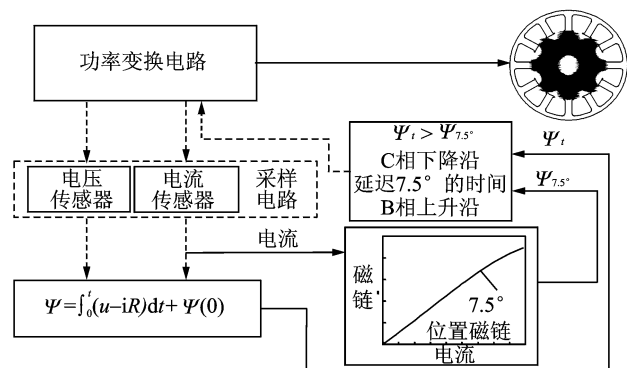


图 3 改进型简化磁链模位置估计原理图

1.3 以 15°为特征参考位置的位置估计

以 15°为特征参考位置的位置估计原理与以 7.5°为特征参考位置基本相同。还是以电机 A 相为例,将实时计算的磁链值与内存存储的 15°磁链值比较,如果实时计算的磁链等于同电流条件下的 15°位置实测磁链,那么 B 相位置信号将产生一个上升沿,即开通 B 相,将 B 相的上升沿时刻延迟 7.5°得到 A 相位置信号的下降沿;同理,C 相位置上升沿和 B 相位置下降沿是通过 B 相的 15°磁链和延时得到,A 相位置上升沿和 C 相位置下降沿通过 C 相的 15°磁链和延时得到。

1.4 两个特征参考位置的位置估计比较

前面分析了分别以 7.5°和 15°为特征位置都可以进行位置估计,但两种方法位置估计的精度不一样。图 4 是本课题组三相 12/8 开关磁阻电机 7.5°和 15°位置实测的磁链 - 电流特性曲线(具体实测方法见 3.2 节),饱和电流大约在 5.5 A 附近。从此图看出,在相电流零到饱和附近之间,相同的相电流变化量对应 7.5°位置的磁链变化量 $\Delta\psi$ 小于 15°位置的磁链变化量,即微处理器在相同的采样时间里在 15°位置上采样的两个磁链点间距比

7.5°采样的两个磁链点间距大,采样点排列稀疏,微处理器计算精度高,所以微处理器在处理以 15°为特征位置比以 7.5°为特征位置的估算出来的位置信号精度要高。当电机重载时,相电流较大,电机一般都处在饱和状态,此阶段 15°和 7.5°位置的磁链 - 电流特性曲线变化缓慢,磁链的变化率相差不大。所以只要 SRM 电机在空载和轻载情况下,通过斩波控制,电机工作在非饱和状态,以 15°为特征参考位置比以 7.5°为特征参考位置估计的位置信号精度要高。

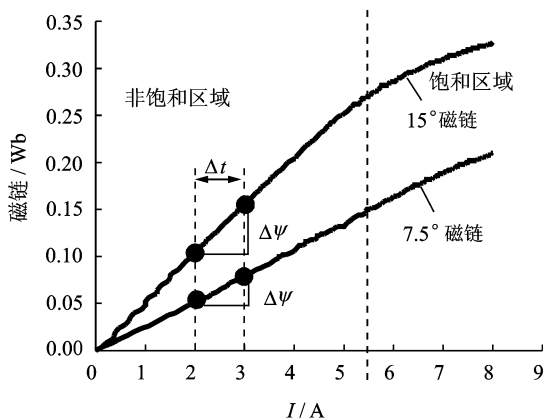


图 4 7.5°和 15°位置磁链特性比较

2 仿真分析

利用 MATLAB/SIMLINK 建模环境,分别建立基于 7.5°和 15°为特征位置的位置估计模型。在非饱和情况,针对不同转速对位置估计进行了仿真分析,并计算不同转速下的位置误差大小,以此来验证上述理论的正确性。图 5 是 SRM 转速为 500 r/min,斩波限电流 4.5 A,在不同特征位置下的 A 相位置估计仿真结果(图中虚线是估计位置,实线是实际位置)。通过计算,得到以 7.5°为特征参考位置估算出来的位置估计误差为 1.088°,以 15°为特征位置估算出来的位置估计误差 0.632°,比以 7.5°为特征参考位置估计的位置误差小 0.456°。

图 6 是 SRM 电机转速为 1 500 r/min,不同特征位置下 A 相位置估计仿真结果。由仿真计算得到以 7.5°为特征位置估算出来的位置误差为 1.067°,而以 15°为特征参考位置估算出来的位置信号误差为 0.526°,比以 7.5°为特征参考位置的位置误差减小了 0.541°。

通过仿真分别得到以 7.5°为特征位置,转速为 1 000,2 000 和 2 500 r/min 下的位置估计误差是

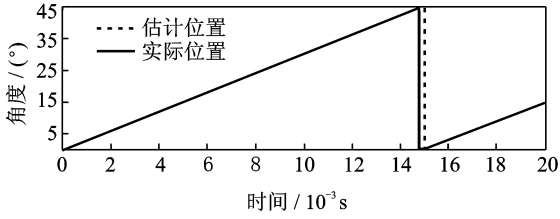
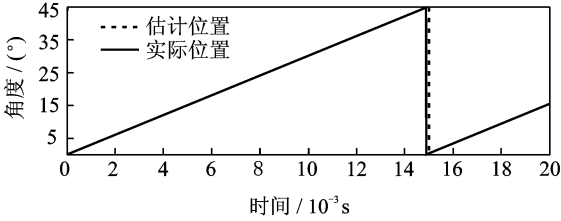
(a) 以 7.5° 为特征位置的位置估计误差(b) 以 15° 为特征位置的位置估计误差

图5 转速 500 r/min 不同特征位置的位置误差

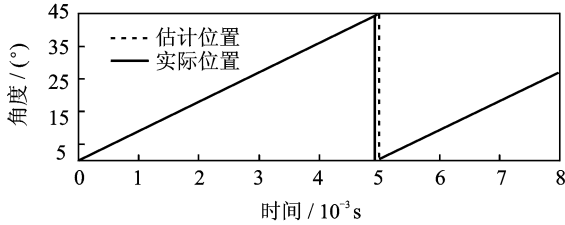
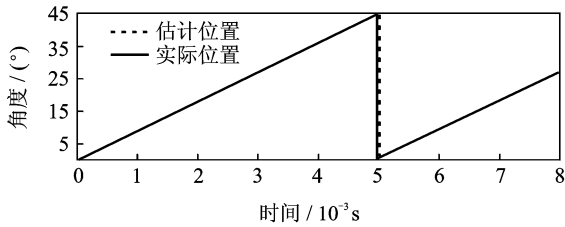
(a) 以 7.5° 为特征位置的位置估计误差(b) 以 15° 为特征位置的位置估计误差

图6 不同特征参考位置 1 500 r/min 位置误差

1.062, 1.044 和 0.965, 以 15° 为特征位置的位置估计误差分别为 0.630, 0.52 和 0.49° 。从位置估计误差仿真结果看出, 在非饱和状态下改进型简化磁链方法以 15° 为特征位置比以 7.5° 为特征位置的位置估计的精确度要高, 通过仿真验证了上述改进型简化磁链位置估计算法的原理。

3 实验结果分析

3.1 实验平台

以开关磁阻电机外围硬件平台和 dSPACE 系统组成开关磁阻电机系统的半实物仿真开发平台, 如图 7 所示, 并以一台三相 12/8 结构 SRM 为实验样机, 样机的额定电压、转速和功率分别为 270 V, 1 500 r/min 和 1.5 kW。A 为 dSPACE 系

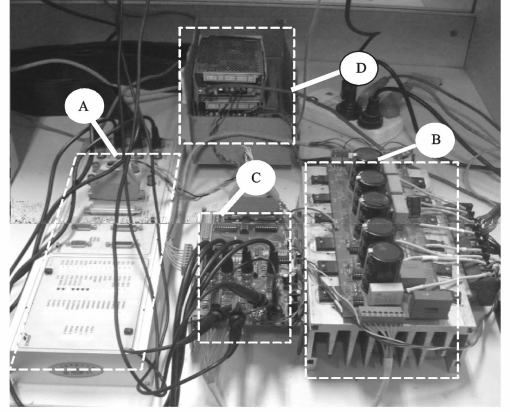


图7 实验平台

统平台; B 为功率变换器; C 为采样、保护与调理电路; D 为辅助电源。

3.2 7.5° 和 15° 位置磁链实测

本文利用 dSPACE 和机械分度头相结合实测特征位置的磁链-电流特性, 在 dSPACE 平台上建立好特征位置磁链计算模型, 用机械分度仪将电机分别卡在 7.5° 和 15° 位置, 给相绕组端通阶跃电压。由于电机绕组呈现感性, 所以相电流有个渐进上升的变化过程, 如图 8 所示。利用这种特性, 既可以计算出 7.5° 和 15° 位置不同相电流下的磁链-电流, 实测结果如图 4 所示。

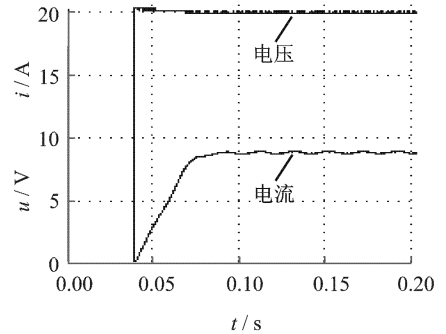
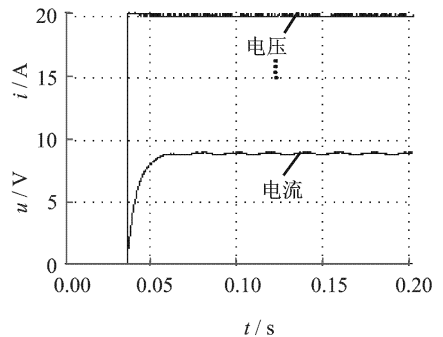
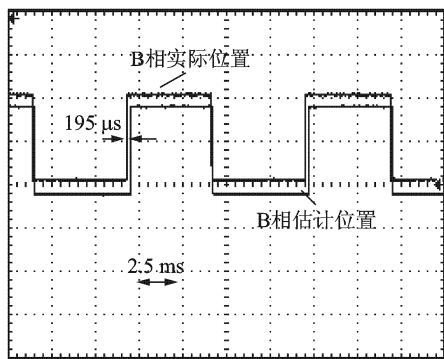
(a) 7.5° 位置相电压与响应电流波形(b) 15° 位置相电压与响应电流波形

图8 不同特征位置相电压与响应电流波形

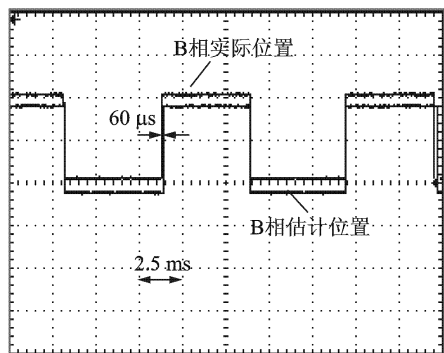
3.3 非饱和运行状态下位置估计实验

本文分别在空载和轻载状态下,对基于改进型简化磁链位置估计策略进行了实验验证。图 9 给出空载情况下 B 相位置估计的实验波形,从实验结果看出,以 7.5° 为特征参考位置,转速 1500 r/min 时,位置估计误差为 $195\ \mu\text{s}$,即相差的位置角为 1.76° ;而以 15° 为特征位置,转速 1500 r/min 时,位置估计误差为 $60\ \mu\text{s}$,即相差的位置角度只有 0.54° ,比以 7.5° 为特征参考位置时位置估计误差减小了 1.22° 。实验结果与前面的仿真结果比较,位置估计误差有些差异,这主要是在实验过程中由于振动、噪音等干扰因素使得传感器采集的电流和电压有误差以及实测特征位置磁链时的测量误差所导致,但从实验总体规律上看与前面的理论仿真还是一致的。

图 10 给出的是轻载情况下位置估计实验波形,负载为 0.26 和 0.36 NM ,转速为 600 r/min ,电流斩波限为 2 A ,此时电机没有进入饱和状态。从实验结果看,在以 7.5° 为特征位置时,位置估计误差为 $185\ \mu\text{s}$,而在以 15° 为特征位置时,位置估计误差几乎为零。进一步验证了本文所提的位置估计策略正确性。

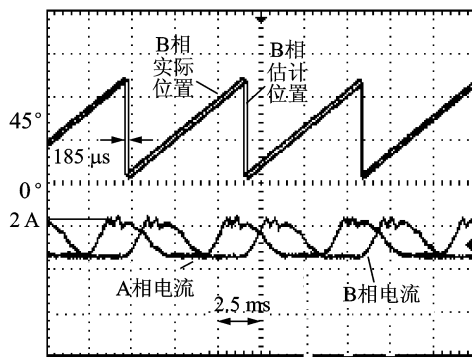


(a) 特征位置 7.5° , 转速 1500 r/min 下 B 相位置信号

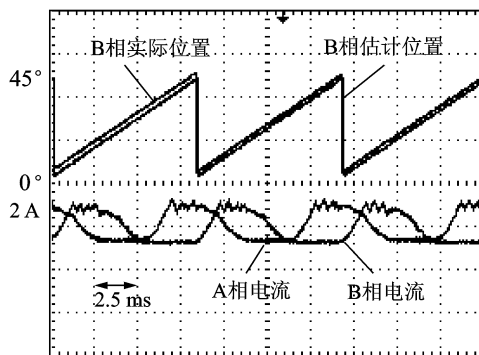


(b) 特征位置 15° , 转速 1500 r/min 下 B 相位置信号

图 9 空载下不同特征位置 B 相位置信号



(a) 特征位置 7.5° , 负载为 0.26 NM 位置估计及相电流



(b) 特征位置 15° 、负载为 0.36 NM 位置估计及相电流

图 10 轻载下不同特征参考位置 B 相位置信号

4 结束语

本文对 $12/8$ 三相 SRM 提出一种基于特征位置的改进型简化磁链位置估计方法。分析了 7.5° 和 15° 两个不同特征参考位置的位置估计精度的不同,并从理论上进行了仿真分析,最后利用建立基于 dSPACE 的 SRM 无位置估计平台,在空载、轻载情况下进行位置估计实验。通过实验与仿真结果比较分析,验证了本文所提出的位置估计方案的可行性,该方法对其他结构的 SRM 电机同样具有参考理论价值。

参考文献:

[1] 邓智泉,蔡骏. 开关磁阻电机无位置传感器技术的研究现状和发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报, 2012,44(5):611-620.
Deng Zhiquan, Cai Jun. Research status and development trends of sensorless techniques of switched reluctance motor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012,44(5):611-620.

[2] Kayikci E, Harke M C, Lorenz R D. Load invariant sensorless control of a switched reluctance drive using high frequency signal injection[C]//39th IAS Annual

- Meeting Conference Record of the 2004 IEEE. Seattle, WA, USA; IEEE, 2004; 1632-1637.
- [3] Nezamabadi M M, Rahmati A, Afjei F. Design and implementation of a sensorless SRM drive with complete isolation [C]//SPEEDAM 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Ischia; [s. n.], 2008; 1053-1058.
- [4] Brosse A, Henneberger G, Schniederneyer G, et al. Sensorless control of a SRM at low speeds and standstill based on signal power measurement [C]//Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE. Aachen: IEEE, 1998; 1538-1543.
- [5] 陈坤华, 孙玉坤, 吴建兵, 等. 基于电感模型的开关磁阻电机无位置传感技术[J]. 电工技术学报, 2006, 21(11): 71-75.
Chen Kunhua, Sun Yukun, Wu Jianbing, et al. Inductance model-based sensorless control of the switched reluctance motors[J]. Transactions of China Electrontechnical Society, 2006, 21(11): 71-75.
- [6] Gao Hongwei, Salmasi F R, Ehsani M. Inductance model-based sensorless control of the switched reluctance motor drive at low speed[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(2): 1568-1573.
- [7] 夏长亮, 王明超, 史婷娜, 等. 基于神经网络的开关磁阻电机无位置传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 123-128.
Xia Changliang, Wang Mingchao, Shi Tingna, et al. Position sensorless control for switched reluctance-motors using neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 123-128.
- [8] 夏长亮, 谢细明, 史婷娜. 开关磁阻电机小波神经网络无位置传感器控制电[J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 33-38.
Xia Changliang, Xie Ximing, Shi Tingna. Position sensorless control of switched reluctance motor using wavelet neural networks[J]. Transactions of China Electrontechnical Society, 2008, 23(7): 33-38.
- [9] Paramasivam S, Arumugan R, Umamaheswari B, et al. Accurate rotor position estimation for switched reluctance motor using ANFIS[C]//IEEE TENCON 2003 Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific Region, Bangalore, India; IEEE, 2003; 1493-1497.
- [10] Lumsdaine A. State observer for variable reluctance motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1990, 37(2): 133-142.
- [11] Koblara T, Sorandaru C, Musuroi S, et al. A low voltage sensorless switched reluctance motor drive using flux linkage method [C]//12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Basov; [s. n.], 2010; 665-672.
- [12] Lyons J P, MacMinn S R, Preston M A. Flux/current methods for SRM rotor position estimation[C]//Conference Record of the 1991 IEEE. Dearborn, MI, USA; IEEE, 1991, 1: 482-487.
- [13] Lopez G, Kjaer P C, Miller T J E. High-grade position estimation for SRM drives using flux-linkage/current correction model[C]//33th IAS Annual Meeting. St. Louis, MO, USA; IEEE, 1998, 1: 731-738.
- [14] 邱亦慧, 詹琼华, 马志源, 等. 基于简化磁链法的开关磁阻电机间接位置检测[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 59-62.
Qiu Yihui, Zhan Qionghua, Ma Zhiyuan, et al. The indirect position sensing of SRM on the basis of simplified flux method[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 59-62.
- [15] 郑洪涛, 蒋静坪, 徐德鸿, 等. 开关磁阻电动机无位置传感器能量优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 153-157.
Zheng Hongtao, Jiang Jingping, Xu Dehong, et al. Switched reluctance motor sensorless drive with energy optimizing control strategy strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 153-157.
- [16] 李珍国, 李彩红, 阚志忠, 等. 基于改进型简化磁链法的开关磁阻电机无位置传感器速度控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 62-66.
Li Zhenguo, Li Caihong, Kan Zhizhong, et al. Switched reluctance motor sensorless speed control based on the improved simplified flux method[J]. Transactions of China Electrontechnical Society, 2011, 26(6): 62-66.

