

基于遗传算法和转矩分配函数的开关磁阻电机 转矩脉动抑制*

费 晨, 颜建虎, 汪 盼, 言 钊
(南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 开关磁阻电机(SRM)特殊的双凸极结构导致其运行时会产生很强的转矩脉动。传统的转矩分配函数(TSF)控制方法虽然可以在一定程度上起到抑制转矩脉动的作用,但是受到开关频率、功率电源电压值等物理条件的限制,仍会存在较大的转矩脉动。为此,提出了一种基于遗传算法的SRM TSF控制方案。利用遗传算法良好的寻优能力,在指数型TSF控制的基础上,将转矩脉动作为优化目标来寻求最优的开关角。将1台四相8/6极的SRM作为研究对象,搭建了以TMS320F28335为控制核心的试验平台。试验结果验证了基于遗传算法的TSF控制方法可以有效减小SRM的转矩脉动。

关键词: 开关磁阻电机; 遗传算法; 转矩分配函数; 转矩脉动

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)12-0006-06

Torque Ripple Suppression of Switched Reluctance Motor Based on Genetic Algorithm and Torque Sharing Function*

FEI Chen, YAN Jianhu, WANG Pan, YAN Zhao

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Torque ripple of switched reluctance motor (SRM) was inevitable due to its special doubly salient motor structure. Although the conventional torque sharing function (TSF) control method of SRM could largely suppress the torque ripple, the torque ripple suppression was still limited by the physical conditions such as the switching frequency and the power supply voltage. A TSF control method was proposed based on genetic algorithm. The torque ripple was used as the optimization target to find the optimal switching angle using the optimization ability of the genetic algorithm. The experimental system based on genetic algorithm using TMS320F28335 was established. The experimental results on designed controller for a 8/6 prototype SRM validated the effectiveness of torque ripple minimization.

Key words: switched reluctance motor (SRM); genetic algorithm; torque sharing function (TSF); torque ripple

0 引 言

开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)是近几十年发展起来的一种新型电机,具有结构简单、坚固耐用、成本低廉、性能可靠、控制参

数多、维护方便等优点。由其构成的调速系统,因具备过载能力强、调速方式灵活多样、调速范围广、起动电流小、容错能力强等特点^[1],在航空航天、煤矿机械、电动汽车、纺织机械等领域具有广阔的应用前景^[2]。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51407094)

作者简介: 费 晨(1993—),男,硕士研究生,研究方向为开关磁阻电机控制技术。

颜建虎(1983—),男,博士,研究方向为新型电机的设计与控制技术。

汪 盼(1994—),女,硕士研究生,研究方向为开关磁阻电机设计与优化。

由于 SRM 特殊的双凸极结构、高度非线性的电磁特性以及开关型的控制方法导致电机在运行时会产生较大的转矩脉动,限制了 SRM 在汽车驱动、伺服控制等高精度控制领域的应用。针对 SRM 转矩脉动的问题,国内外专家学者主要从电机本体结构和电机控制方法两方面开展了一系列研究^[3-4]。抑制 SRM 转矩脉动的控制方法主要有转矩分配函数(Torque Sharing Function, TSF)控制、电流斩波控制、直接转矩控制、人工神经网络控制和自适应控制等^[5-9]。TSF 控制方法因具有易于实现且转矩脉动抑制效果佳等优点,在 SRM 控制领域得到了广泛应用。文献[10]在 TSF 控制的基础上利用神经网络来建立电机的转矩模型和磁链模型,以提高模型的准确性,从而降低转矩脉动。文献[11]在电机处于换相阶段时,对前一相的 TSF 进行正补偿,对后一相的 TSF 实行负补偿,从而实现转矩脉动的抑制。文献[12]在指数型 TSF 的基础上进行改进,实现了对转矩脉动和运行效率的综合优化。文献[13]在换相区域定义了两种目标函数,综合考虑了转矩脉动和铜耗,在宽调速范围中降低转矩脉动,同时不增加铜耗。文献[14]在 TSF 控制的基础上,将瞬时转矩的误差转化成可变的反馈增益,从而实现转矩误差的减小。这些方法从不同方面对 TSF 控制进行了优化,都可以较好地抑制转矩脉动,但都没有很好地衡量开通、关断角度对转矩脉动的影响。

本文结合遗传算法和 TSF 控制,设计了一种基于遗传算法的 SRM TSF 控制方案。在指数型 TSF 的基础上,利用遗传算法,将转矩脉动作为优化目标来寻取最优的开关角。通过搭建 SRM 的调速系统,对该控制方法进行了试验分析,试验结果验证了该方法可以有效地抑制 SRM 的转矩脉动。

1 SRM 数学模型

SRM 基本方程包括:电压方程、电流方程、运动方程和转矩方程等。

电压方程为

$$U_k = R_k i_k - e_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (1)$$

式中: U_k 、 R_k 、 i_k 、 e_k 、 ψ_k ——第 k 相的电压、电阻、电流、感应电动势和磁链。

电流方程为

$$i_k = \int \frac{U_k - R_k i_k - \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt}}{\frac{\partial \psi_k}{\partial i_k}} = \int \frac{U_k - R_k i_k - \frac{\partial \psi_k}{\partial \theta} \omega}{L_k} \quad (2)$$

式中: ω ——电机运转的角速度;

L_k ——第 k 相的电感。

运动方程为:

$$T_e = J \frac{d^2 \theta}{dt} + D \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (3)$$

式中: T_e ——电磁转矩;

J ——转动惯量;

D ——摩擦因数;

T_L ——负载转矩。

转矩方程为

$$T_x = \left. \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right|_{i=\text{const}} = - \left. \frac{\partial W}{\partial \theta} \right|_{\psi=\text{const}} \quad (4)$$

式中: T_x ——在 x 处的瞬时电磁转矩;

W' ——绕组的磁共能;

W ——绕组的磁储能。

这些算式虽然从理论上建立了 SRM 中电磁和力学上的联系,但是变量之间的严重非线性导致其在实际应用中存在困难。

常用的 SRM 数学模型包括线性模型、准线性模型和非线性模型几类。其中:线性模型应用较为简便但误差较大。准线性模型是采用分段线性化的原理,将磁路饱和、非饱和两种情况分开考虑,由此对电感、磁链分段解析。准线性模型虽然相对于线性模型精度有了一定的提升,但是仍存在较大的误差。非线性模型主要包括:人工神经网络、查表法、有限元法、解析法等方法。综合考虑以上因素,选用查表法来建立 SRM 的转矩模型。

针对 1 台四相 8/6 极的 SRM,对其矩角特性进行了测量。SRM 矩角特性如图 1 所示,此处对应的绕组电流为 0~3 A,每隔 0.2 A 进行一次测量。

图 1 中,定义定子齿与转子槽中心线对齐时转子的位置角 θ 为 30° ,定义定子齿与转子齿正对齐时转子的位置角 θ 为 60° 。

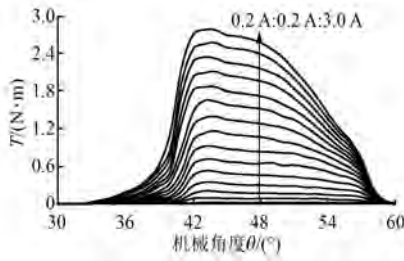


图1 SRM 矩角特性(i=0~3 A)

2 遗传算法

2.1 个体适应度评价

遗传算法是一种通过模拟大自然中生物的繁衍进化过程而产生的智能算法。该算法具有较强的鲁棒性和自适应优化能力。

遗传算法的操作步骤为：编码-解码方式确定,主要参数确定,种群初始化,适应度计算,遗传操作等。其中,遗传操作包括选择运算、交叉运算和变异运算。

遗传算法中适应度的值决定了每个个体被遗传到下一代种群中的概率,适应度越高,遗传到下一代的概率越大。适应度的计算是遗传算法中的关键问题之一。

式(5)描述了在约束条件下的函数最值问题：

$$\begin{cases} \max f(X) \\ \text{s.t. } X \in R \\ R \subseteq U \end{cases} \quad (5)$$

式中：X——决策变量, $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$;

$f(X)$ ——目标函数；

R——解空间；

U——基本空间。

在遗传算法中,适应度的值必须是非负数。为了达到该要求,一般可以通过以下两种方法来实现。

(1) 对于求最大值的优化问题。

$$F(X) = \begin{cases} f(X) + C_{\min} & f(X) + C_{\min} > 0 \\ 0 & f(X) + C_{\min} \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中： C_{\min} ——一个相对较小的数。

(2) 对于求最小值的优化问题。

$$F(X) = \begin{cases} C_{\max} - f(X) & f(X) < C_{\max} \\ 0 & f(X) \geq C_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中： C_{\max} ——一个相对比较大的数。

2.2 遗传算子

遗传算子有3类：选择算子、交叉算子和变异算子。

比例选择算子是选择算子中最常用的一种,其基本方式是,各个体被选中的概率与适应度值成正比。若个体*i*的适应度为 f_i ,整个种群的数目为*M*,那此个体*i*被选中的概率为

$$P_i = f_i / \sum_{k=1}^M f_k \quad (8)$$

交叉算子在整个遗传算法中起到了核心作用,进一步丰富了整个种群中基因的多样性。

单点交叉算子是交叉算子中最通用的一种,如图2所示。任意选择种群中的2个个体,对其一个点进行交叉运算。

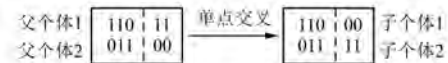


图2 单点交叉示意图

变异算子的作用是模仿自然界中的变异进行操作,通过对种群中任意个体的某个基因进行变异操作来产生新的个体。变异操作示意图如图3所示。均匀变异算子是变异运算中最常用的一种。变异算子可以对某个个体的某位基因进行变异操作,以防止优化问题的过早收敛。



图3 变异操作示意图

3 基于遗传算法的 TSF

3.1 指数型 TSF

SRM 特殊的双凸极结构和严重的非线性带来了较大的转矩脉动。在常规的控制方法中,换相过程中会产生很大的转矩脉动,这是由于下一相开通产生的转矩增量并不等于上一相关断引起的转矩跌落。

为此,TSF 控制方法将转子位置角和开通、关断角度作为输入,通过计算得出各相需要的实时转矩,并以此作为各相的转矩给定,来实现 SRM 的恒转矩控制。

TSF 控制方法,一般有两条设计准则:(1)各相只产生正的转矩;(2)在任一瞬时,只有一相或

者相邻两相通电。

常用的 TSF 类型包括:直线型、正弦型、立方型、指数型。这 4 种 TSF 控制方法均能够降低 SRM 运行时的转矩脉动,其中指数函数形式的 TSF 能够获得最大的调速范围,而且转矩脉动抑制效果也最好。因此,选择在指数型 TSF 的基础上进行优化分析。

图 4 所示为 SRM 指数型 TSF 的波形图,其输出转矩在相邻两相的重叠区随着角度变化呈指数型变化。第 k 相的转矩指令指数下降,第 $k+1$ 相的转矩指数上升,以补足第 k 相的转矩跌落,两相转矩之和即为给定转矩。

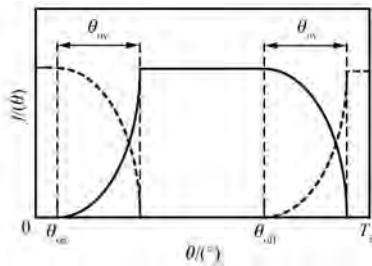


图 4 指数型 TSF 波形

指数型 TSF 的表达式为

$$f_k(\theta) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \theta \leq \theta_{on} \\ 1 - \exp\left[-\frac{(\theta - \theta_{on})^2}{\theta_{ov}}\right] & \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ 1 & \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} \\ \exp\left[-\frac{(\theta - \theta_{off})^2}{\theta_{ov}}\right] & \theta_{off} \leq \theta \leq \theta_{off} + \theta_{ov} \\ 0 & \theta_{off} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \tau_r \end{cases} \quad (9)$$

式中: θ_{on} 、 θ_{off} 、 θ_{ov} ——开通角、关断角和相邻两相的换相重叠角;

τ_r ——转子极距。

式(9)中,TSF 控制方法的参数中开通角 θ_{on} 、关断角 θ_{off} 可以改变,不同的参数对应不同的 TSF 曲线。在某一确定的运行工况下,必然可以找到使转矩脉动最小的一组参数。

3.2 开关角寻优

将遗传算法引入 TSF 控制方案,对 TSF 的开通、关断角度进行进一步的优化。

图 5 所示为加入遗传算法的 TSF 控制方法的结构框图。

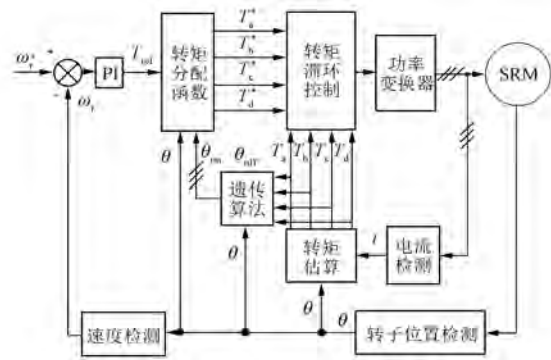


图 5 基于遗传算法的 TSF 控制框图

图 5 中,转速 PI 对转速差进行比例积分运算得到转矩给定 T_{ref} ,接着转矩分配模块将转矩实时分配给各相,作为各相的转矩给定 T_k^* 。另外,转矩估算模块根据检测到的各相电流和转子位置信息,通过预存的查表模块查出各相当前的瞬时转矩 T_k 。遗传算法通过测量转矩脉动来优化开关角度。转矩滞环控制模块将比较各相的期望转矩 T_k^* 和实际瞬时转矩 T_k ,生成开关信号输入到功率变换器中来驱动各相的开关管。

由于本文采用四相 8/6 极 SRM,一个周期为 60° 机械角度,因此在 TSF 中开通角和关断角的差为一固定值 15° 。由此设计遗传算法的个体维数为 1,种群规模为 4,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.001,最大迭代代数为 100 代,解空间 $\theta_{on} \in [30^\circ, 40^\circ]$ 。

为了便于进行编程实现,将各个种群的信息用一个表格来呈现,如表 1 所示。

表 1 遗传算法种群信息表

个体编号	个体	适应度
1	X_1	$f(X_1)$
2	X_2	$f(X_2)$
3	X_3	$f(X_3)$
4	X_4	$f(X_4)$

图 6 为遗传算法的运行流程图。在程序运行之初每相设置一个初始的开、关角度,共 4 组初始角度;然后通过在电机运行中测量其对应的转矩,以求出其转矩脉动,作为该组的适应度;最后用遗传算子对种群进行选择、交叉、变

异产生下一代种群。

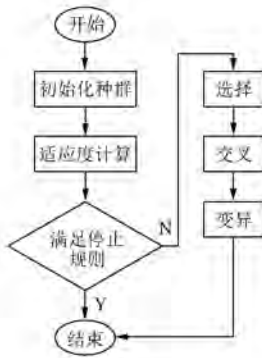


图6 遗传算法流程图

根据遗传算法的收敛性,随着迭代的进行,整个种群将会收敛到一个最优的适应度状态,即获得一组最优的开关角,从而完成寻优。

4 试验结果与分析

以TI公司的TMS320F28335 DSP作为控制核心,搭建了SRM调速系统的试验平台,如图7所示。



图7 控制系统试验平台

电机采用1台四相8/6极的SRM,其参数如表2所示。

表2 电机参数

参数名称	参数值
额定功率/W	500
定子极数	8
转子极数	6
定子相电阻/ Ω	8
L_{min}/mH	25
L_{max}/mH	200
转动惯量/ $(kg \cdot m^2)$	0.001

用1台2500线的增量式光电编码器测量SRM的位置,用4个电流传感器分别采集四相的电流,由1台磁粉制动器作为电机的负载。

主电路采用不对称半桥的拓扑结构。DSP的脉宽调制输出频率设置为20kHz,对功率变换器采用单管斩波控制。

转矩设定为 $1 N \cdot m$,试验分别在传统的角度位置控制、指数型TSF控制和本文的方法3种情况下进行,并使电机分别运行在500 r/min和1000 r/min两种情况下。观察其电流响应和转矩脉动。

图8为电机在转速为500 r/min的情况下的相电流和总的电磁转矩的波形,可以看到在优化开通、关断角度之后,转矩脉动有一定的减小。

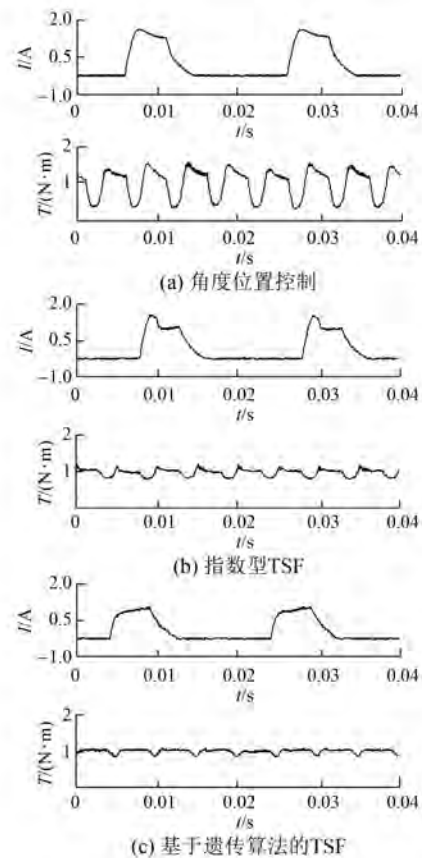


图8 500 r/min时的波形对比

图9为电机在转速为1000 r/min的情况下的一相电流和总的电磁转矩的波形,可以明显看出,相比前两种控制方式,优化开通、关断角度之后,转矩脉动减小。

通过分析对比图8和图9中的3种控制方法,

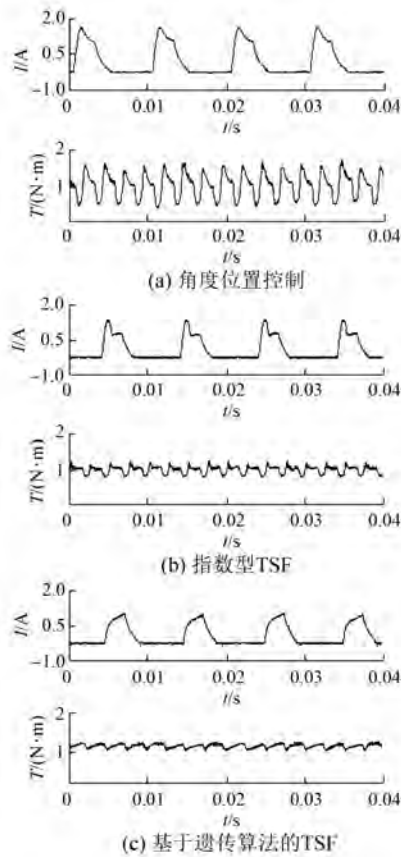


图9 1 000 r/min 时的波形对比

可以看出基于遗传算法的 TSF 控制方法抑制转矩脉动的能力比指数型 TSF 有了进一步的提高。

为了量化对比两种控制方案的转矩脉动大小,在此定义转矩脉动率 k_T ,其表达式为

$$k_T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: T_{\max} 、 T_{\min} 、 T_{avg} ——总的电磁转矩的最大值、最小值和转矩平均值。

转矩脉动系数对比如表 3 所示。

表 3 转矩脉动系数对比

控制方法	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	T_{\max} / ($\text{N} \cdot \text{m}$)	T_{\min} / ($\text{N} \cdot \text{m}$)	T_{avg} / ($\text{N} \cdot \text{m}$)	k_T / %
角度位置	500	1.591 7	0.317 7	1.006 4	126.59
	1 000	1.738 6	0.376 6	1.013 8	134.34
指数型	500	1.214 4	0.792 5	0.977 5	43.15
	1 000	1.258 5	0.778 3	0.991 0	48.46
遗传算法	500	1.092 4	0.843 7	0.994 7	25.00
	1 000	1.196 3	0.904 9	1.058 7	27.52

5 结 语

为了进一步优化传统的指数型 TSF 控制方法在 SRM 运行时的转矩脉动,本文设计了一种基于遗传算法的 SRM TSF 控制方案。将遗传算法应用到 TSF 的开、关角度在线优化上,能够在指数型 TSF 的基础上进一步降低转矩脉动。以 1 台四相 8/6 极的 SRM 为研究对象,搭建了以 TMS320F28335 为核心的试验平台,针对基于遗传算法的 SRM 的 TSF 控制方法,对其进行试验分析。通过几种控制方法在不同转速下的对比分析,试验结果验证了该方法能进一步降低转矩脉动。

【参考文献】

- [1] 潘晓晨,张广明,王德明.基于改进的转矩分配函数法的 SRM 转矩间接控制[J].电机与控制应用,2016,43(5): 1-6.
- [2] 孙刚,张磊.开关磁阻电机特征点交截的转子位置估计方法[J].电机与控制应用,2016,43(6): 13-16.
- [3] 李哲,郑玲,杨威,等.开关磁阻电机转矩脉动及结构优化设计研究[J].电机与控制学报,2018,22(6): 11-21.
- [4] 马铭遥,余发,杨晴晴,等.基于注入分段式谐波电流抑制开关磁阻电机转矩脉动的控制策略[J].中国电机工程学报,2018,38(1): 285-291.
- [5] YE J, BILGIN B, EMADI A. An offline torque sharing function for torque ripple reduction in switched reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 726-735.
- [6] 王旭东,王喜莲.开关磁阻电动机电流双幅值斩波控制[J].中国电机工程学报,2000,20(4): 83-86.
- [7] GAH C, WU J, SUN Q, et al. Low-cost direct instantaneous torque control for switched reluctance motors with bus current detection under soft-chopping mode [J]. IET Power Electronics, 2016, 9(3): 482-490.
- [8] 夏长亮,陈自然,李斌.基于 RBF 神经网络的开关磁阻电机瞬时转矩控制[J].中国电机工程学报,2006,26(19): 127-132.
- [9] 王喜莲,许振亮.基于 PI 参数自适应的开关磁阻电机调速控制研究[J].中国电机工程学报,2015,35(16): 4215-4223.

(下转第 18 页)

转速闭环控制。最后,在 12/8 极样机上的试验验证了所提方法的可行性。该方法控制策略简便易行,具有较强的普适性;速度控制器能快速跟随目标转速,具有较好的动态响应性能。

【参考文献】

- [1] 胡丽杰.混合励磁开关磁阻电机驱动控制技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [2] 管小舒,陈昊.基于自抗扰控制的开关磁阻电机转速闭环性能[J].电工技术学报,2012,27(7): 17-25.
- [3] 郑洪涛,蒋静坪,徐德鸿.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.
- [4] 熊立新,高厚磊,徐丙垠.开关磁阻发电机最大输出功率的控制原则[J].电机与控制学报,2009,13(3): 250-254.
- [5] 孙鑫,赵德安,田传帮.开关磁阻风力发电系统最大功率追踪策略研究[J].微特电机,2008,36(10): 42-44.
- [6] 吴建华.开关磁阻电机设计与应用[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [7] 辛凯,詹琼华.基于相电流梯度法的开关磁阻电机间接位置检测[J].微电机,2006,39(6): 28-31.
- [8] BATEMAN C J, MERCOW B C, CLOTHIER A C, et al. Sensorless operation of an ultra-high-speed switched reluctance machine[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(6): 2329-2337.
- [9] 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.
- [10] 夏长亮,谢细明,史婷娜,等.开关磁阻电机小波神经网络无位置传感器控制[J].电工技术学报,2008,23(7): 33-38.
- [11] 陈坤华,孙玉坤,吴建兵,等.基于电感模型的开关磁阻电动机无位置传感技术[J].电工技术学报,2006,21(11): 71-75.
- [12] 周竟成,王晓林,邓智泉,等.开关磁阻电机的电感分区式无位置传感器技术[J].电工技术学报,2012,27(7): 34-40.
- [13] 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.

收稿日期: 2018-07-06

(上接第 11 页)

- [10] 姚雪莲,齐瑞云,邓智泉,等.基于在线模糊神经网络的开关磁阻电机高性能转矩控制[J].电机与控制应用,2011,38(3): 17-22.
- [11] 吴建华,孙国庆.基于转矩分配函数在线修正的开关磁阻电机转矩脉动抑制策略[J].电机与控制学报,2017,21(12): 1-8.
- [12] 王喜莲,许振亮,王翠.开关磁阻电机转矩脉动与铜耗最小化控制研究[J].电机与控制学报,2015,19(7): 52-57.
- [13] YE J, BILGIN B, EMADI A. An extended-speed low-ripple torque control of switched reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1457-1470.
- [14] SAHOO S K, DASGUPTA S, PANDA S K, et al. A Lyapunov function-based robust direct torque controller for a switched reluctance motor system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 555-564.

收稿日期: 2018-07-06

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部