

基于直接转矩控制算法的SRM转矩脉动抑制研究

开关磁阻电动机 (Switched Reluctance Motor, SRM) 具有系统构架简单、造价低、控制技术多样化及运行性能好等优点。但由于SRM的独特结构致使其磁路严重非线性, 在运转流程中会产生较大转矩振荡及噪声, 这在一定程度上遏制了SRM的应用进展。参照异步电动机的直接转矩控制思想, 将直接转矩控制算法应用在SRM上, 并利用Matlab中的仿真组件, 来验证直接转矩控制算法应用在SRM上的可行性。结果显示直接转矩控制能够遏制SRM的转矩脉动。

胡中华¹ 李 洋² 王凯凯¹ / 1. 上海应用技术学院电气与工程学院
2. 南京工业大学学院电气工程与自动化学院

0 引言

开关磁阻电动机 (Switched Reluctance Motor, SRM) 基于其优异的性能特征, 已应用于国内外众多领域, 目前国内的SRM主要应用在高温、多粉尘等环境较恶劣的工业场合, 如刨床、油田和煤炭领域等。在这些领域中, SRM将其优势表现得淋漓尽致, 应用成本低、系统效率高且经济效益好, 一直受到工业界的欢迎^[1]。

而在家电、电动车等小功率领域中, SRM应用较少, 这主要由于SRM的独特结构致使其拥有严重的非线性, 在运转中会产生较大转矩脉动^[2]。转矩脉动过大会使电动机运转中产生噪声和振动, 若应用在家电、电动车中, 会让人们无法接受长期的噪声和振动。而且洗衣机、电动汽车对电动机转速有较高的要求, 这就加大了对SRM的控制难度^[3]。而转矩脉动及由脉动引发的噪声这一连环问题是影响SRM进一步发扬的

主要因素, 若解决了电动机的转矩振荡问题, 则噪声也随之解决, 因此, 如何抑制SRM的转矩波动是SRM的研究热点之一^[4]。

直接转矩控制最早应用于异步电动机的控制, 其控制思想是通过分析定、转子磁链间的一阶延迟环节, 得出直接转矩控制下只与定子侧参数有关^[5]。然后定义合适的基本空间电压矢量, 利用空间电压矢量改变磁链, 而转矩的改变则是调节定、转子磁链间的角度实现的, 结合磁链、转矩滞环比较器就可以实现转矩在较小范围内波动, 实现转矩脉动的抑制^[6]。这种控制方式简单有效, 易执行, 且只需要考虑定子侧参数, 其他参数的改变对输出性能影响较小。为此, 参照异步电动机的直接转矩控制控制思想, 将直接转矩控制算法应用到SRM上, 最终实现对电动机转矩的调控, 减小脉动。这对SRM系统性能的提高、应用领域的扩大具有重大意义^[7]。

1 SRM的直接转矩控制算法

参考异步电动机的直接转矩控制原理图, 设计SRM直接转矩控制的原理图如图1所示。

直接转矩控制的过程如下: SRM运行过程传输出来的参数通过磁链计算和转矩计算环节得到的三相定子磁链值 Ψ_a 、 Ψ_b 、 Ψ_c 和三相合成转矩 T ; 将三相定子磁链 Ψ_a 、 Ψ_b 、 Ψ_c 进行 $\alpha-\beta$ 坐标变换后, 得到 Ψ_α 、 Ψ_β , 并在定子坐标系中计算磁链幅值 Ψ 与矢量角度 δ , δ 用来判断磁



胡中华/硕士研究生

关键词/Keywords

开关磁阻电动机 ·
转矩脉动 ·
直接转矩控制 ·
Matlab ·

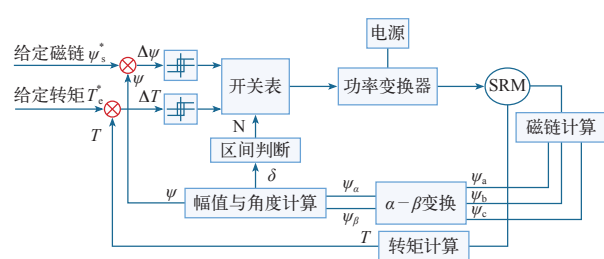


图1 SRM直接转矩控制原理图

链所在位置；将计算得到的磁链 Ψ 和转矩 T 分别与给定的 Ψ_s^* 和 T_e^* 进行比较，并将差值 $\Delta\Psi$ 和 ΔT 作为比较器的输入，同时矢量角 δ 进行位置区域判断；将比较器的输出信号及区间判断信号一起作为开关表的输入信号，然后通过操作指令输出合适的信号值对功率开关管进行控制，进而完成对SRM的控制。

1.1 功率变换器的开关状态

由于定子磁链的幅值是由所选取的空间电压矢量决定的，如何选取适当的电压矢量至关重要。而电压矢量可以由SRM各相绕组的当前电压状态组合确定。由于SRM的每相绕组是由功率变换器独立控制的，功率变化电路决定了各相绕组的电压状态，不同的功率变换电路会产生不同的电压状态。为此，本文采用的是非对称半桥功率变换电路，可使绕组获得三种电压状态。即“正”、“负”和“零”三种状态。由于SRM各相独立，为简洁清晰地描述，以一相桥路为例进行分析。如图2所示，其中 VT_1 、 VT_2 为功率开关管， VD_1 、 VD_2 为续流二极管。

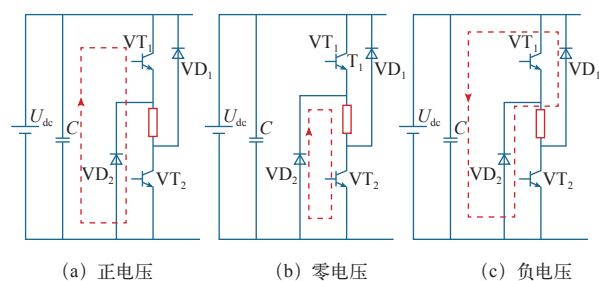


图2 绕组的电压状态

1) 在图2中，当某相桥路的上下开关管 VT_1 、 VT_2 都导通时，励磁电压源给予绕组正极性电压，定

义此正电压为状态“1”。其电流通路如图2a所示。

2) 当某相桥路上有一只开关管导通（假设为 VT_2 ），另一只关断（假设为 VT_1 ）时，此时励磁电源不供给绕组电压，绕组端部电压为0，定义此零电压为状态“0”。电流通路如图2b所示。

3) 当某相桥路上开关管 VT_1 、 VT_2 均断开时，此时为绕组中的电流回流阶段，绕组的电压极性为负，定义此负电压为状态“-1”。此时电流通路如图2c所示。

1.2 空间电压矢量的构建与选取

由于开关磁阻电动机的每一相都有3种电压组合方式，则三相6/4结构的SRM一共有27种组合，分别为(1,1,1)、(1,1,0)、(1,1,-1)、(1,0,1)、(1,0,0)、(1,0,-1)、(1,-1,1)、(1,-1,0)、(1,-1,-1)、(0,0,1)、(0,0,0)、(0,0,-1)、(0,1,1)、(0,1,0)、(0,1,-1)、(0,-1,1)、(0,-1,0)、(0,-1,-1)、(-1,1,1)、(-1,1,0)、(-1,1,-1)、(-1,0,1)、(-1,0,0)、(-1,0,-1)、(-1,-1,1)、(-1,-1,0)和(-1,-1,-1)。但并不是这27种组合方式都能正常工作，因为开关磁阻电动机实际运行时不可能有两相绕组同时励磁，绕组的电压不能同时为正、为零或为负，比如(1,1,1)、(0,0,0)等不能被选取作为基本电压矢量，还有一些组合会影响电动机的转矩，不利于直接转矩控制的实施。通过筛选，选取如下6个基本电压矢量： $V_1(1,0,-1)$ 、 $V_2(0,1,-1)$ 、 $V_3(-1,1,0)$ 、 $V_4(-1,0,1)$ 、 $V_5(0,-1,1)$ 、 $V_6(1,-1,0)$ 。幅值相等且相位相差 $\pi/3$ 弧度。图3为SRM的基本空间电压矢量示意图。

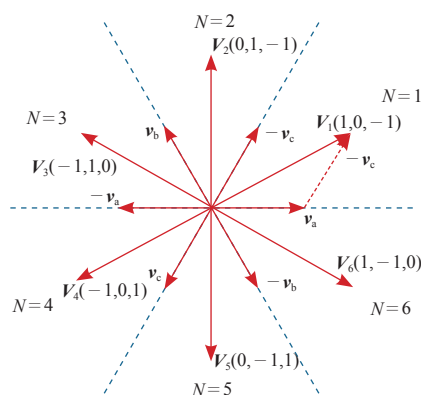


图3 空间电压矢量图

1.3 磁链整定及转矩调节

在忽略相电阻的情况下, 定子电压矢量与磁链矢量之间的关系为

$$U = \frac{d\Psi(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

变换得

$$\Psi = \int_0^t U dt \quad (2)$$

在直接转矩控制中, 需将电动机磁链和转矩控制在滞环宽内, 因此可能施加电压的时间会很短, 则式(2)可变换为

$$\Delta\Psi = U\Delta t \quad (3)$$

从式(2)可以看出, 任意时刻定子磁链矢量的方向取决于电压矢量的方向, 电压矢量作用的时间 Δt 决定磁链增量的大小, 所以只要能够准确地控制电压通、断区间就能很好地将磁链和转矩控制在一定范围内。

在滞环比较器控制下的磁链运动路径如图4所示。

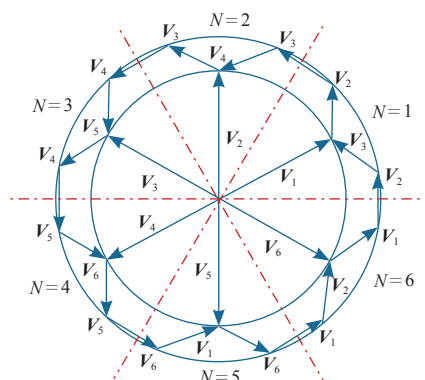


图4 磁链运动路径矢量图

从运动轨迹图中可以看出, 在某一时刻, 若磁链矢量位于区域 $N=1$, 根据矢量叠加的几何关系, 可以选择 V_2 或者 V_6 使磁链增大, 其中选择 V_2 可以使磁链沿逆时针方向增大, 选择 V_6 可以使磁链沿顺时针方向增大。若使磁链减小, 则可以选择 V_3 或者 V_5 , 其中 V_3 可以使磁链沿逆时针方向减小, V_5 可以使磁链沿顺时针方向减小。当磁链分别增大和减小达到滞环上限和下限时, 此时就需要用电压矢量来分别减小和增大磁链。

推广到区域 K 中, 若要使磁链幅值变大, 则

需选取电压矢量 V_{k+1} 和 V_{k-1} ; 若要使磁链幅值减少, 则需选取电压矢量 V_{k+2} 和 V_{k-2} 。而电动机的转矩 T 的正负是由 $\partial\Psi/\partial\theta$ 决定的, 若要使 T 增大, 则需选取使磁链超前转子运动方向的电压矢量。假设在区域 $N=3$ 内, 以图中 ω 旋转方向为正向, 若要增大电磁转矩, 选取电压矢量 V_4 和 V_5 , 使得磁链向正方向旋转; 若要减小转矩, 选取 V_1 和 V_2 , 使得磁链向反方向旋转。推广到 K 区域, 如果要增大转矩, 可以选择矢量 V_{k+2} 和 V_{k+1} , 如果要减小转矩, 则可以选择矢量 V_{k-1} 和 V_{k-2} 。

2 SRM直接转矩控制仿真

根据前文对直接转矩控制系统的结构描述, 本文在Matlab的Simulink仿真环境中搭建的SRM直接转矩控制系统仿真图如图5所示。

为了更好地体现SRM直接转矩控制策略与传统控制策略的性能, 分别给出SRM电流滞环控制(CCC)的系统仿真和直接转矩控制的仿真, 并将仿真结果进行分析对照。电流滞环控制仿真如图6所示。

仿真结果如图7和图8所示。

将直接转矩控制和电流斩波控制控制下转矩的仿真结果分析对照, 可以看出电流斩波控制控制方式下转矩波动较大, 波动范围约为 $20 \sim 140 \text{ N}\cdot\text{m}$, 而直接转矩控制下转矩响应速度较快, 3 ms 左右转矩基本保持稳定, 波动范围较小, 约为 $11.5 \sim 12.5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 仅约 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的波动幅度。由此可见, 直接转矩控制下比电流斩波控制控制能更加有效抑制转矩脉动, 从而转矩噪声也大大减少。

2.1 仿真结果分析

2.1.1 磁链分析

如图9所示, 直接转矩控制方式下的磁链矢量轨迹图整齐利落, 逼近圆形, 且磁链幅值波动较小, 幅值基本稳定。而电流斩波控制控制方式下的磁链矢量图类似圆边三角形, 磁链幅值波动较大且磁链较为紊乱。相比而言, 直接转矩控制方式下对磁链的控制比电流斩波控制方式更加有效。

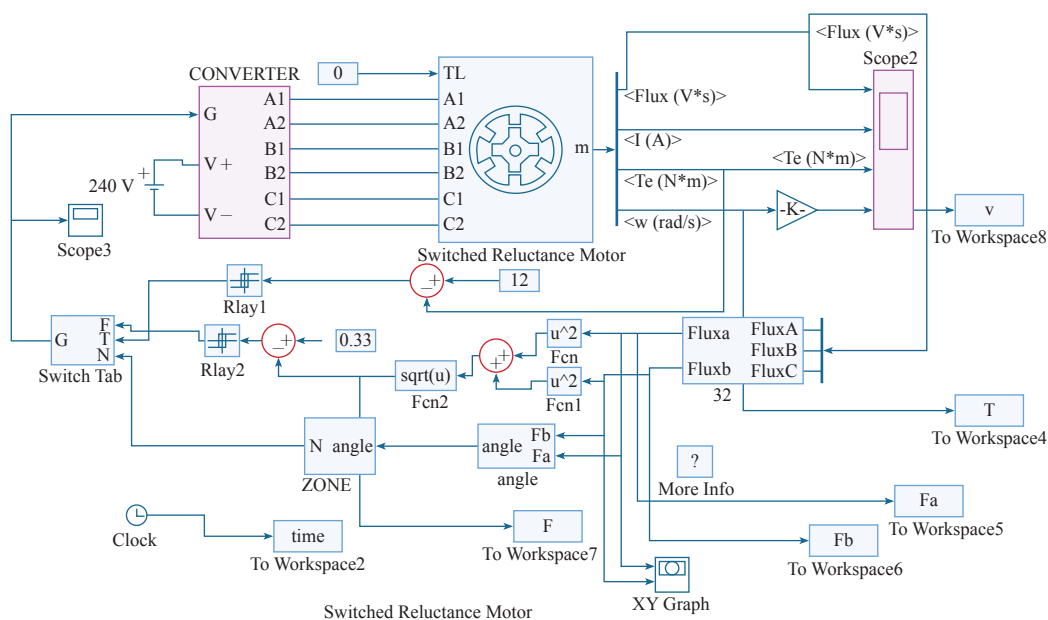


图5 SRM直接转矩控制仿真模型

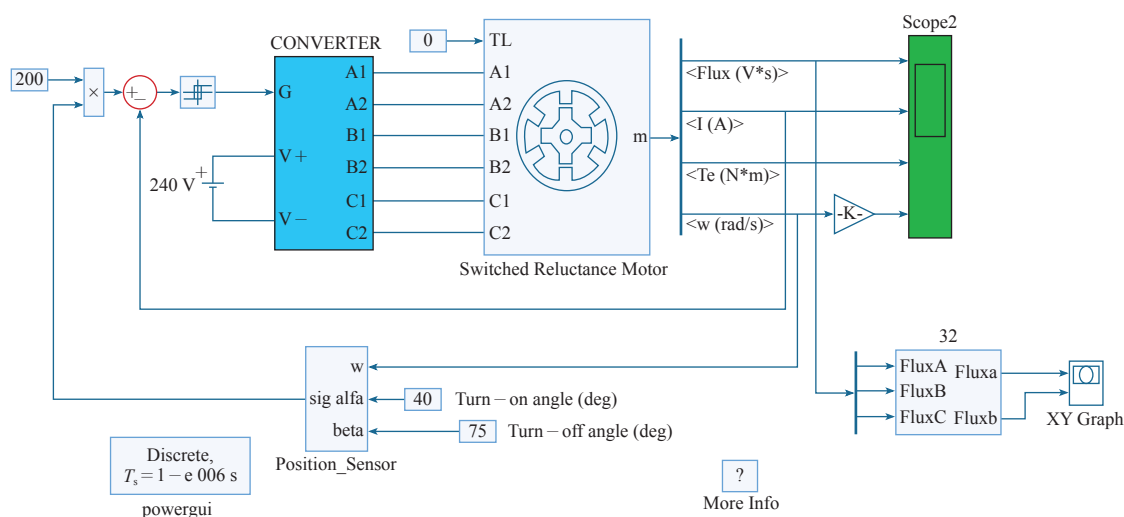


图6 CCC控制仿真图

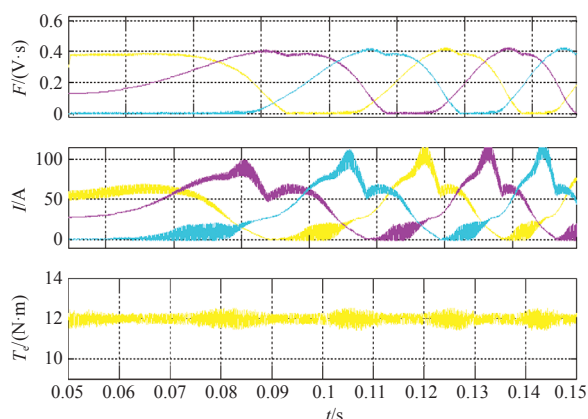


图7 直接转矩控制仿真结果图

将磁链幅值的数据导入到To Workspace模块中保存为数组格式，并用Plot命令画出磁链幅值波形，如图10所示。

图10中定子磁链的大小基本在0.32~0.34 Wb范围内波动，很好地实现了前文提出的直接转矩控制的目标一，即将定子磁链幅值控制在滞环范围内波动。

2.1.2 给定磁链值突变情况分析

为了进一步验证直接转矩控制对磁链的控制作用，本文在给定的磁链值发生突变的情况下进

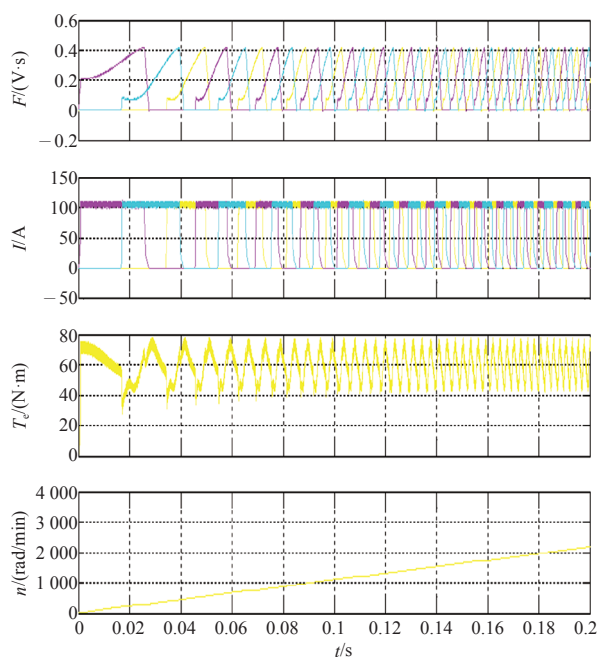


图8 CCC仿真结果图

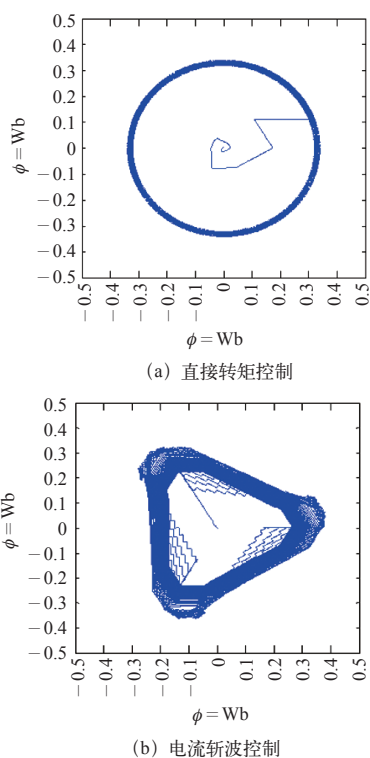


图9 磁链轨迹图比较

行仿真。参数设置如下：磁链和转矩给定值分别为0.33 Wb和12 N·m，滞环带宽不变，零负载启动。在0.15 s时将给定的磁链值由0.33 Wb提升到0.38 Wb，稳定后在0.25 s时再将磁链值变回原值0.33 Wb，观察结果如图11所示。

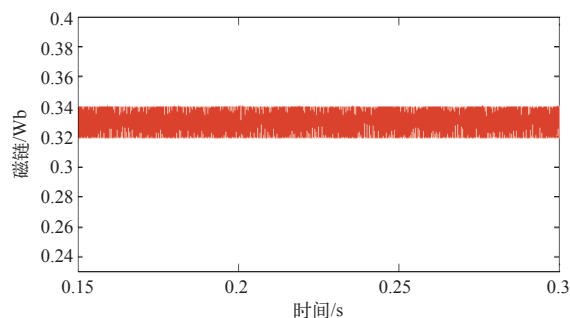
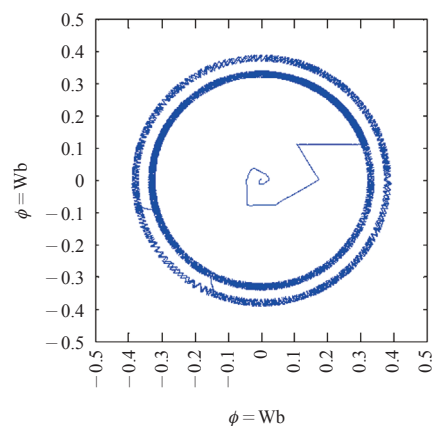
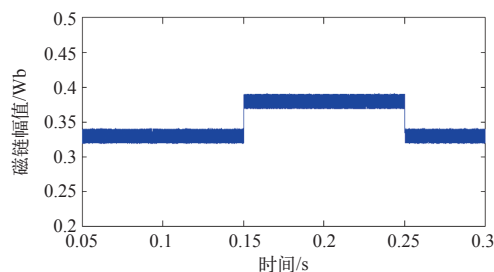


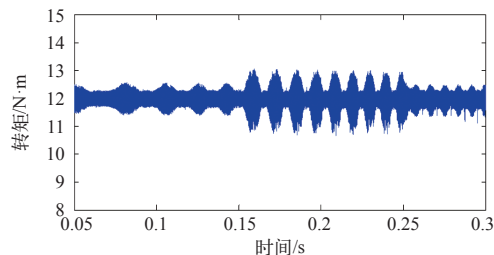
图10 磁链幅值波形图



(a) 磁链矢量变化图



(b) 磁链幅值变化图



(c) 转矩变化图

图11 直接转矩控制在给定磁链值突变情况下的结果分析

从图11可以看出，直接转矩控制方式下能够对磁链进行较好的控制。在0.15 s处磁链突变增大时，磁链的响应速度很快，约2 ms后达到稳定，在0.25 s处又以很快的响应速度回到初始值，并且

磁链幅值和磁链运动轨迹都发生较明显的变化。图11中还可以看出,磁链的改变对转矩有较大的影响,在0.15 s和0.25 s之间合成转矩的波动明显增大,波动幅度由原先的1 N·m增大到约2 N·m。这也实现了前文所说的直接转矩控制目标二,即可以通过调整磁链来控制转矩。因此,选取的磁链幅值是否合理,对转矩的性能影响很大。

3 结束语

论文利用Matlab/Simulink仿真组件建立了开关磁阻电动机的直接转矩控制仿真模型,并与电流斩波控制进行对比,通过分析对照两种控制策略对电动机磁链、转矩的影响,可以发现,直接转矩控制方式下的磁链矢量图圆滑平缓,幅值基本稳定;而电流滞环控制方式下的磁链矢量图形状紊乱且不规则,波动范围大。这实现了SRM在直接转矩控制方式下的一个控制指标——将定子磁链维持恒定并在滞环范围内。同时对比转矩可以看出,电流滞环控制的转矩波动较大,约为 $20 \sim 140 \text{ N} \cdot \text{m}$;而直接转矩控制方式下的转矩波动被很好地限制在滞环宽度内,波动范围很小,约为 $11.5 \sim 12.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。这验证了应用直接转矩控制算法在SRM上的有效性,说明直接转矩控制能够很好地抑制开关磁阻电动机的转矩脉动。接着在直接转矩控制方式下,对给定磁链值和负载进行突变,结果表明:磁链突变情况下,磁链幅值跟随变化,同时转矩波动发生较明显的改变,波动幅度由原先的 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 增大到约 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$,实现了直接转矩控制的另一个指标——控制磁链来调节转矩。

参考文献

- [1] Sau S, Vandana R, Fernandes B G. A new direct torque control method for switched reluctance motor with high torque/ampere [C]. Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE, IEEE, 2013; 2518-2523.
- [2] Sun Q, Cao X, Deng Z. Direct torque and force control for dual-winding bearingless switched reluctance motor [C]. 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), IEEE, 2014; 1875-1880.
- [3] Kumar R S, Vasanth J A. Intelligent neuro controller based speed and torque control of five phase switched reluctance motor [C]. 2013 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES), IEEE, 2013; 966-973.
- [4] Sau S, Vandana R, Fernandes B G. A new direct torque control method for switched reluctance motor with high torque/ampere [C]. Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE, IEEE, 2013; 2518-2523.
- [5] 何强. 开关磁阻电机调速系统控制策略的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [6] 杨艳, 刘泽远, 邓智泉. 一种新型无轴承开关磁阻电动机性能分析 [J]. 微特电机, 2014 (11).
- [7] 张丽, 李彦哲. 电动汽车用开关磁阻电动机控制角度优化的研究 [J]. 电气应用, 2015 (4).

(收稿日期: 2015-07-26) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告