

文章编号: 1671- 251X(2010)12- 0058- 04

基于在线搜索的感应电动机模糊节能控制

陈可， 杨文焕

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对传统的按转子磁链定向的感应电动机间接矢量控制系统在轻载情况下效率低的问题, 提出了一种将基于在线搜索的模糊节能控制方法引入到传统的感应电动机控制系统中的设计方案。该方案在感应电动机瞬态运行时采用按转子磁链定向的间接矢量控制方法; 在感应电动机稳态运行时采用基于在线搜索的模糊节能控制方法, 以测得的直流输入功率作为控制量进行模糊寻优控制, 可使电动机在最大效率处运行。仿真结果验证了该方案的正确性和有效性。

关键词: 感应电动机; 轻载; 节能; 在线搜索; 间接矢量控制; 模糊控制; 最大效率

中图分类号: TD614 **文献标识码:**A

Fuzzy Energy-saving Control of Induction Motor Based on Online Searching

CHEN Ke, YANG Weihuan

(School of Optical Electrical Information and Computer Engineering of University of
Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In view of problem of low efficiency existed in traditional indirect vector control system of induction motor based on rotor flux linkage orientation under light load, the paper proposed a design scheme of introducing fuzzy energy-saving control method based on online searching into traditional control system of induction motor. The scheme uses indirect vector control method based on rotor flux linkage orientation in transient operation of motor, and uses fuzzy energy-saving control method based on online searching in stable operation of motor, which taking DC input power as control variable to make fuzzy optimization control, so as to make motor operate at maximum efficiency. The simulation result

收稿日期: 2010- 08- 12

作者简介: 陈可(1984-), 男, 江苏南通人, 上海理工大学光电
信息与计算机工程学院在读硕士研究生, 主要研究方向为电动机与
电器。E-mail: bentley_chen@hotmail.com

从表 1 可看出, 该仪表的计量精度优于 0.2%, 流量的变化对计量精度影响不大, 证明了基于 ARM 的电子胶带秤控制仪表设计合理。

5 结语

基于 ARM 的电子胶带秤控制仪表采用由数据采集器和显示控制器 2 个独立的部分组成的设计方式, 不仅提高了仪表的抗干扰能力, 而且方便升级, 只要两者之间的通信协议不变, 每部分都可以采用较先进的技术实现。采用 ARM 处理器设计显示控制器, 提高了仪表的运算处理能力, 便于扩充仪表的功能和实现先进的控制算法。

参考文献:

- [1] 方原柏. 电子皮带秤的现状和发展动向[J]. 衡器, 2006, 36(6): 3-8.
- [2] ZHAO Yanan, COLLINS E G. Fuzzy PI Control Design for an Industrial Weight Belt Feeder [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2003, 11(3): 311-319.
- [3] 林宝全, 郑崇苏. 电子皮带秤的硬件设计与控制算法的仿真[J]. 江苏电器, 2008(10): 41-43.
- [4] 李刚, 林凌, 何峰, 等. 高性能 SoC 模拟信号处理单片机 MSC1210 原理与开发应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [5] 徐爱钧. IAR EWARM 嵌入式系统编程与实践[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.

proved correctness and effectiveness of the scheme.

Key words: induction motor, light load, energy saving, on line searching, indirect vector control, fuzzy control, maximum efficiency

0 引言

感应电动机具有可靠性高、价格低的优点，在工业领域得到了广泛应用，随着矢量控制技术的应用，又使得它的调速性能得到了极大的提高。目前，世界各国相继开发了电动汽车用感应电动机驱动系统，然而感应电动机采用传统的按转子磁链定向的间接矢量控制方式在轻载情况下效率低的缺点又限制了它的应用。因此，研究感应电动机最大效率控制技术意义重大：对电动汽车而言，能够节约电池能量，大大延长行驶里程；更为重要的是，它对整个社会环境和国民经济能源节约有着深远的影响^[1]。

目前感应电动机的节能运行控制方案分为损耗模型控制和搜索控制 2 类。前者基于电动机的损耗模型，具有计算速度快、振荡调整小等优点。但缺点是严重依赖电动机的数学模型，而目前所能找到的公式大多是经验公式和简化公式，即使能找到精确的数学模型，由于实际运行中电动机参数很难准确测量且时变性强，数学模型也很难适应。后者的优点在于控制起来不需要电动机参数，且对参数的变化完全不敏感，可以广泛用于各种电动机。

本文提出了一种将基于在线搜索的模糊节能控制方法引入到传统的感应电动机控制系统中的设计方案。该方案在电动机瞬态运行时采用传统的按转子磁链定向的间接矢量控制方式，在电动机稳态运行时采用节能运行控制方式，即采用基于模糊技术的在线搜索节能控制器。仿真结果验证了该方案的可行性。

1 在线搜索节能技术的原理

在进行电动机调速时，通常希望电动机中转子磁链为额定值，并保持不变。如果磁链太弱，没有充分利用电动机铁芯，是一种浪费；如果过分增大磁链，又会使铁芯饱和，从而导致过大的励磁电流。然而在实际应用中，电动机经常轻载运行，如果此时仍保持励磁电流为额定值，就造成了能量的浪费。

图 1(a) 说明了一种获取最大效率的在线磁链搜索方法：假设电动机最初运行在额定磁链条件下，并以某一速度稳态运行在某一低于额定负载的转矩下，通过减小定子电流的励磁分量 i_{ds} 以逐步减小转

子磁链 Ψ 。由于速度控制环的存在导致定子电流的转矩分量 i_{qs} 增加，以使新产生的转矩与稳态运行时的转矩相同。如图 1(b) 所示，随着磁链的减少，铁损减小，铜损增加，但电动机控制系统的总损耗在减小，从而提高了总的效率，另外，当铜损与铁损数值相等时，系统的总损耗达到最小，效率达到最高^[2]。这种变化关系在图 1(a) 中的反映：在输出功率不变的情况下，直流输入功率减小了。在线磁链搜索不断继续直到电动机控制系统达到最小输入功率(最大效率)即 A 点处，任何试图想超过 A 点的搜索将反过来影响效率并使搜索方向反向，使运行驻留在 A 点。在线磁链搜索方法的优点在于控制时不需要电动机参数，对参数的变化完全不敏感，并可广泛应用于任何电动机。

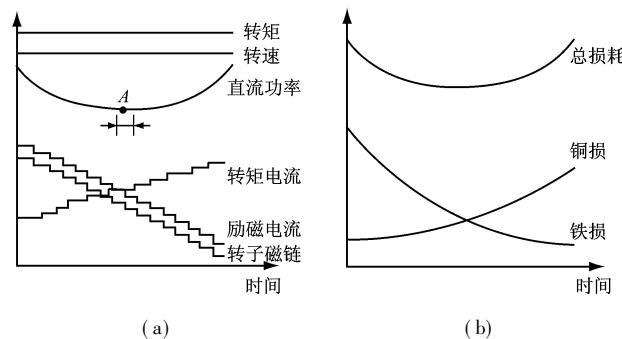


图 1 在线磁链搜索方法

2 系统组成

图 2 为带有模糊控制器的按转子磁链定向的电动机间接矢量控制系统结构，是在传统的磁链开环的按转子磁链定向的间接矢量控制系统结构的基础上，加入了一个模糊控制器。励磁电流减小的程度是自适应的，其控制可以获得快速的收敛性。转矩电流分量 i_{qs}^* 由速度环产生。矢量旋转器(dq/abc)从一个切换开关的 2 个位置分别获得转矩电流命令和励磁电流命令：(1) 瞬态位置，此时励磁电流为其额定值 i_{dsr} ，转矩电流为 i_{qs}^* ；(2) 稳态位置，此时励磁电流 i_{qs}^* 和转矩电流 i_{qs}^* 由模糊控制器和前馈转矩补偿器产生。因此，模糊控制器仅在稳态条件下有效，即当速度闭环误差 $\Delta \omega$ 接近于零时。

在电动机处于稳态时进行最大效率控制(模式 2)，由于励磁电流的下降，电动机控制系统的暂态(模式 1)响应会变得很慢。因此，当电动机控制

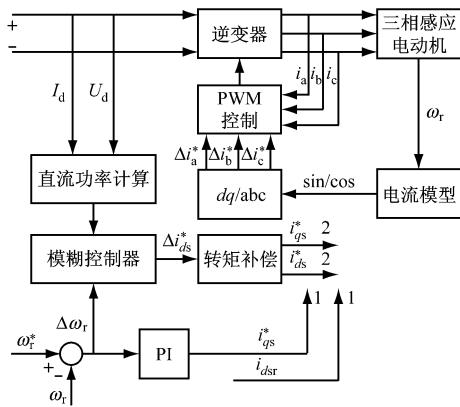


图 2 带有模糊控制器的按转子磁链定向的电动机
间接矢量控制系统结构

系统的设定转速或者负载转矩发生改变时, 励磁电流必须恢复到额定值, 转矩电流也应直接由速度环给定, 当系统稳定后再恢复到最大效率控制。2 种模式的切换以连续采样的速度绝对误差(Δn)为标准。为防止切换的误动作, 应连续采样 3 次并进行判断。从模式 1 切换到模式 2 的条件是 $\Delta n < \varepsilon_1$, 从模式 2 切换到模式 1 的条件是 $\Delta n > \varepsilon_2$ 。同时为了保证 2 种模式切换的稳定性, 应设计一个滞环比较器, ε 应高于 ε_1 ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为滞环比较器的下、上限^[3])。

3 模糊控制器的设计

3.1 模糊控制器结构

图 3 为模糊控制器结构。直流环节输入功率 $P_d(k)$ 被采样并与前一时刻的值进行比较, 产生变化量 $\Delta P_d(k)$, 并判断最后的励磁电流变化量 $L\Delta i_{ds}^*(pu)$ 的极性, 基于这些输入信号, 由模糊推理系统产生下一时刻励磁电流的变化量 $\Delta i_{ds}^*(pu)$ 。量化因子 P_b 的值越大, 则输入的敏感度越低, 偏差量 $\Delta P_d(k)$ 的控制作用越弱。这说明电动机效率可以提高的程度与电动机的转速成反比。量化因子 I_b 的值越小, 则模糊控制器的控制作用越弱, 电动机控制系统的动态响应过程越长; I_b 的值越大, 则模糊控制器的控制作用越强, 电动机控制系统的响应越快, 易超调, 但如果 I_b 的值过大将使系统振荡。

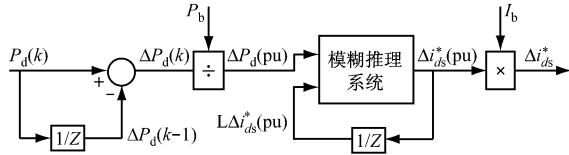


图 3 模糊控制器结构

量化因子 P_b 和 I_b 是可编程的, 随着电动机的转速、转矩而变化, 使这些变量对转矩-速度平面上

的工作点位置不敏感。 P_b 和 I_b 可表示为

$$\begin{aligned} P_b &= A \omega_r + B \\ I_b &= C_1 \omega_r - C_2 T_e + C_3 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: 系数 A, B, C_1, C_2, C_3 为常数(由仿真研究确定); ω_r 为转速; T_e 为转矩估计量, 可表示为

$$T_e = K_t i_{ds}^* i_{qs}^* \quad (2)$$

式中: K_t 为一系数^[4]。

3.2 模糊搜索算法

模糊控制器的输入为 $\Delta P_d(pu)$ 、 $L\Delta i_{ds}^*(pu)$, 输出为 $\Delta i_{ds}^*(pu)$ 。 $\Delta P_d(pu)$ 和 $L\Delta i_{ds}^*(pu)$ 均由 7 个不对称的三角形隶属函数描述, 而 $L\Delta i_{ds}^*(pu)$ 由 2 个隶属函数(正和负)描述, 相应的隶属函数如图 4 所示。

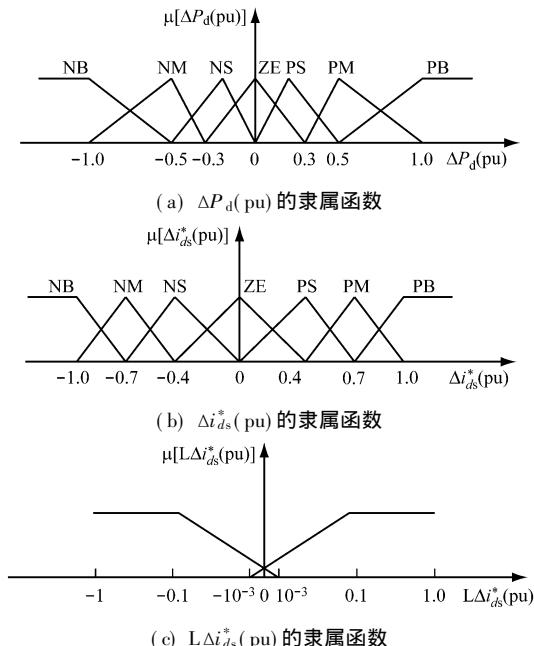


图 4 模糊变量的隶属函数

表 1 为模糊搜索的控制规则。该控制规则的基本思路: 如果最后的励磁电流的变化使得直流输入功率在减小, 那么搜索方向不变, 并且控制量的大小应与测量得到的直流环节功率的变化成正比; 当控制行为使直流输入功率增加, 则改变搜索方向。

表 1 模糊搜索的控制规则

$\Delta P_d(pu)$	$L\Delta i_{ds}^*(pu)$	
	N	P
PB	PM	NM
PM	PS	NS
PS	PS	NS
ZE	ZE	ZE
NS	NS	PS
NM	NM	PM
NB	NB	PB

在运行过程中,励磁电流 Δi_{ds}^* (pu) 的步长逐渐减小,直至做小幅度的振动,使得系统到达稳态时,直流输入功率 P_d 围绕着 A 点作小幅度的摆动。

4 脉动转矩补偿

前馈脉动转矩补偿的基本原理如图 5 所示,该补偿器通过加入等价的 Δi_{qs}^* 补偿因 i_{ds} 减小而损失的转矩,以使输出转矩保持不变。否则,仅由速度闭环对 i_{qs} 慢补偿将在低采样频率时产生较大的脉动转矩。补偿电流可表示为

$$\Delta i_{qs}^*(k) = \frac{\Psi_r(k-1) - \Psi_r(k)}{\Psi_r(k)} i_{qs}^*(k-1) \quad (3)$$

式中: $\Psi_r(k)$ 为转子磁链矢量的幅值。

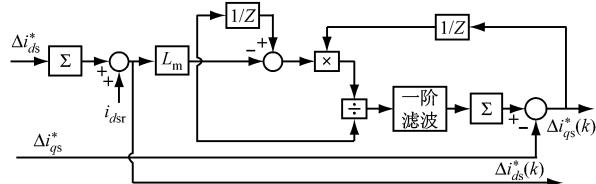


图 5 前馈脉动转矩补偿的基本原理

在转矩补偿中,由于 $\Delta i_{qs}^*(k)$ 的响应是瞬时的,而 Δi_{ds}^* 的响应存在转子时间常数 τ_r 的延迟,所以信号 $\Delta i_{qs}^*(k)$ 必须通过一个一阶滤波器来延迟 τ_r 的时间。

5 仿真分析

本文利用 Simulink 进行仿真研究。仿真电动机基本参数:额定电压为 380 V, 额定频率为 50 Hz, 极对数为 2, 额定转速为 1 500 r/min, 额定功率为 11 kW, $R_s = 0.435 \Omega$, $L_{1s} = 0.002 \text{ H}$, $R_r = 0.816 \Omega$, $L_{1r} = 0.002 \text{ H}$, $L_m = 0.069 \text{ H}$, 铁耗等效电阻 $R_m = 30 \Omega$, $J = 0.19 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。由于 Simulink 自带的三相感应电动机未考虑铁损,自建考虑铁损的三相感应电动机模型^[5]。

图 6 为模糊搜索控制方式下转速为 300 r/min (0.2 pu)、负载转矩为 10 N·m (0.1 pu) 时电动机的转速、转矩、励磁电流、转矩电流、直流输入功率的仿真曲线。电动机启动 0.2 s 后进入模糊搜索阶段,模糊搜索过程中,电动机的转速和输出转矩保持稳定。正常启动后在 $t = 0.8 \text{ s}$ 时达到最大效率点,转矩电流与励磁电流的变化则相反。图 7 为相同情况下采用按转子磁链定向的间接矢量控制方式的直流输入功率仿真曲线。与图 6(e) 相比,在相同转速和负载下,采用模糊搜索控制方式比按转子磁链定向的间接矢量控制方式的效率提高约 25%。

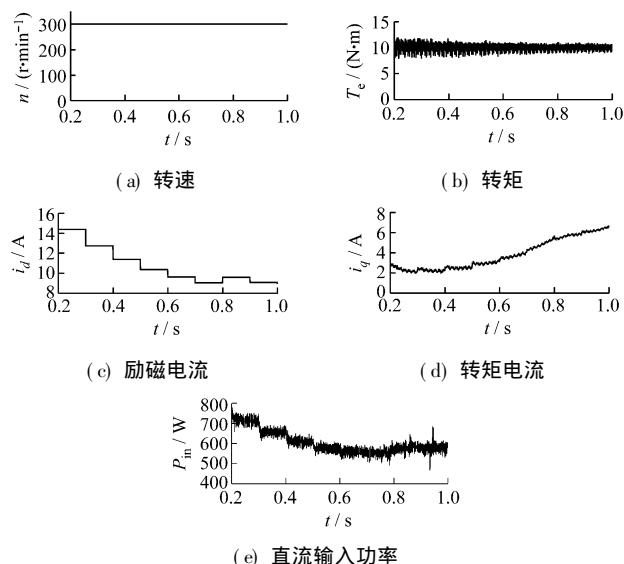


图 6 模糊搜索控制方式下电动机的仿真曲线

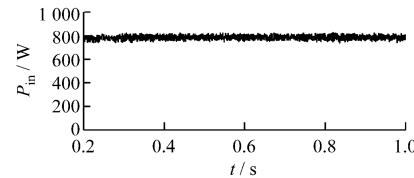


图 7 按转子磁链定向的间接矢量控制方式下电动机的直流输入功率仿真曲线

6 结语

介绍了将基于在线搜索的模糊节能控制方法引入到传统的按转子磁链定向的感应电动机间接矢量控制系统中的方案设计。仿真结果表明,该方案搜索快、收敛性好,在电动机轻载运行时有较为明显的节能效果。

参考文献:

- [1] 王爱元,凌志浩.感应电机压频比调节的模糊节能控制[J].电气自动化,2008,30(6): 23-24, 44.
- [2] SO USA G C D, BOSE B K, CLELAND J G. Fuzzy Logic Based On line Efficiency Optimization Control of an Indirect Vector controlled Induction Motor Drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995, 42(2): 192-198.
- [3] 刘小虎,谢顺衣,郑立捷.一种改进的感应电机最大效率控制技术研究[J].中国电机工程学报,2005, 25(6): 95-98.
- [4] 陈伯时,陈敏逊.交流调速系统[M].2 版.北京:机械工业出版社,2005.
- [5] 芦晓静,温旭辉,张立伟,等.考虑铁损的异步电机仿真建模[J].电机与控制应用,2005, 32(8): 36-10.