

文章编号: 1001-0920(2009)05-0743-06

基于模糊技术感应电机最大效率控制策略的研究

徐占国, 邵 诚

(大连理工大学 电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 针对感应电机效率控制过程中存在的寻优速度慢以及对电机参数依赖性大等问题, 基于模糊技术, 提出一种新的最大效率控制策略. 由电动机损耗模型选取最优磁链搜索初值, 根据输入功率偏差的大小自动调整模糊控制维数, 大大提高了搜索速度, 同时确保了效率寻优的稳定性. 采用前馈补偿方法, 并引入一阶微分环节解决了效率控制中的低频转矩脉动和转矩快速响应问题. 仿真和实验结果表明, 所提出的控制策略是有效的.

关键词: 感应电机; 模糊技术; 效率控制; 损耗模型; 转矩快速响应

中图分类号: TM346

文献标识码: A

Maximum efficiency control strategy of induction motor based on fuzzy logic

XU Zhan-guo, S HAO Cheng

(School of Electronics and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China.

Correspondent: XU Zhan-guo, E-mail: xzgdut@163.com)

Abstract: The methods commonly employed in maximum efficiency control of induction motor are sensitive to motor parameters, and have long convergence time. Therefore, based on fuzzy logic, this paper proposes a new maximum efficiency control strategy. Its initial value is chosen by the induction motor loss-model. The input number of fuzzy control can be adjusted automatically according to the input power deviation, so the searching speed is improved greatly and the stability of efficiency optimization is achieved. The problems of low-frequency pulsating torque and torque fast response are solved by using a feedforward compensation algorithm and a first order differentiator. The simulation and experiment results show the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: Induction motor; Fuzzy logic; Efficiency control; Loss model; Torque fast response

1 引 言

感应电机因其结构坚固、体积小、价格便宜、运行中几乎不需要维护等优点, 已在工业中得到广泛的应用. 而矢量控制与直接转矩控制技术的出现, 又使得其调速性能达到甚至超越了直流调速. 近年来, 感应电机在电动汽车、潜艇等使用有限能源供电的装置中也得到了广泛应用, 而效率则成为电机驱动系统一个新的重要的技术指标^[1].

目前, 感应电机运行效率的提高大多通过改变电机运行时磁链幅值的大小来实现, 主要方法可归纳为损耗模型法^[2]和搜索法两种. 损耗模型法实时性好, 但对电机参数依赖性大. 而搜索法则完全不依赖电机参数, 适用于任何电机, 而且可以使包括逆变

器在内的整个系统的损耗最小. 诸如梯度法和黄金分割法等常规一维搜索法在电机效率优化方面已经取得一些成果^[3-5]. 而一些智能控制方法的引入则使得效率控制器在寻优速度等方面又有很大的改善, 尤其是模糊控制技术应用更多. 文献[6]提出基于模糊技术设计效率控制器, 控制器仅在稳态时起作用; [7]以牺牲动态时系统快速响应性能为代价, 进一步将模糊效率控制用于负载或速度突变引起的瞬态过程; [8]利用易于测量的定子电流代替直流侧输入功率作为输入变量来设计模糊效率控制器; [9]利用损耗模型解决了模糊效率控制器中输入输出变量比例因子的实时计算问题; [10]给出了一种模糊化的电机损耗模型, 并与常规搜索法相结合进行效率优化,

收稿日期: 2008-02-29; 修回日期: 2008-06-29.

基金项目: 国家 973 计划项目(2007CB714006).

作者简介: 徐占国(1974—), 男, 吉林扶余人, 讲师, 博士生, 从事电力电子与电气传动、智能控制等研究; 邵诚(1958—), 男, 江苏靖江人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与控制、自适应控制等研究.

这种混合法同时具有损耗模型法速度快和搜索法不依赖于电机参数等优点; [6-10]中的效率控制器均用于矢量控制系统; [11]则设计了一种适用于VVVF变频驱动系统的模糊效率控制器。

文献[6-11]在设计模糊控制器时,多采用将控制目标(如输入功率)偏差和输出量(如励磁电流)的上次变化量作为输入变量的二维结构;而最优励磁电流(最优磁链)搜索初值均简单地取为某一固定值(多取为额定值)。本文所设计的模糊效率控制器则有以下不同:1)根据直流侧输入功率的偏差情况决定是否将直流侧输入功率偏差变化率作为第3输入变量,即模糊控制器维数是可适时调整的;2)搜索初值不再取某一固定值,而是根据损耗模型进行选取。这些方法在确保效率寻优的稳定性、提高快速性等方面非常有效。另外,文中对转矩脉动前馈补偿方法和动态时转矩快速响应问题也进行了研究。仿真与实验表明,所提出的控制策略是有效的。

2 控制系统

图1为具有模糊效率控制器的感应电机间接矢量控制系统总体结构。模糊控制器通过检测直流侧输入功率来搜索励磁电流最优值,使运行效率最大。转矩补偿环节用于抑制低频转矩脉动,其输出转矩电流补偿值与速度调节器的输出相叠加,作为转矩电流给定 i_{m1}^* 。模糊效率控制器和转矩补偿环节只在稳态时起作用,即稳态时 i_{m1}^* 由模糊控制器给定。而在动态时,为了提高动态响应的快速性,将转子磁链设定为额定值,一阶微分环节 ($T_r P + 1$) 的作用是使转子磁链快速达到额定值。系统动态和稳态的区分由状态鉴别器实现,其输入量为转矩电流变化量,输出为开关信号,用于决定模糊效率控制器和转矩补偿环节是否起作用。

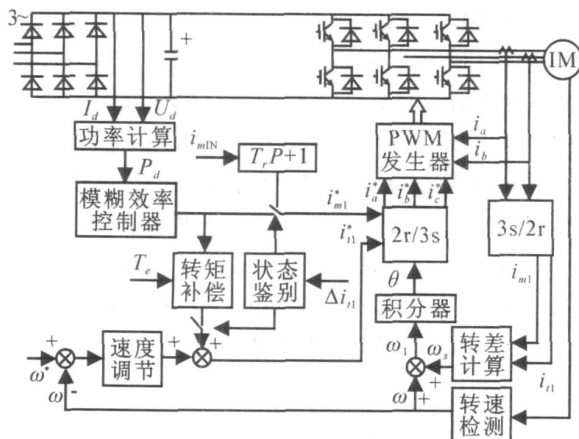


图1 具有模糊效率控制器的感应电机间接矢量控制系统

2.1 模糊效率控制器

图2为模糊效率控制器结构。其模糊输入变量

分别为直流侧输入功率偏差 P_d (pu), 输入功率偏差变化率 \dot{P}_d (pu) 和上次励磁电流变化量 $i_{m1}(k-1)$ (pu), 控制器的输出则是当前时刻励磁电流给定 $i_{m1}^*(k)$ 。

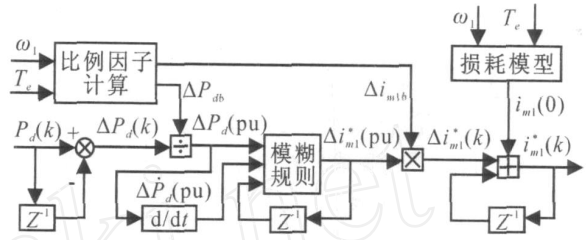


图2 模糊效率控制器结构

当系统由动态进入稳态时,模糊控制器开始投入工作。此时,利用损耗模型,根据当前运行速度和负载大小计算最优励磁电流的估计值 i_{m1-opt} ,并将其作为搜索初值 $i_{m1}(0)$,即

$$i_{m1}(0) = i_{m1-opt} = \left[\frac{R_t(1) T_c}{R_m(1) k_r} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

其中

$$k_t = p \frac{L_m^2}{L_r}, \quad R_m(1) = R_1 + \frac{2L_m^2}{R_{fe}}$$

$$R_t(1) = R_1 + \frac{L_m R_2}{L_r} + \frac{2L_m L_r}{R_{fe} L_r^2}$$

L_m 为定转子互感, L_r 为转子自感, L_s 为定子自感, L_{lr} 为转子漏感, R_1 为定子电阻, R_2 为转子电阻, R_{fe} 为铁损耗电阻, p 为极对数, ω_1 为同步转速。

显然,与搜索初值选为某一固定值相比,由损耗模型估算的初值更接近最优值,搜索范围大大减小。为了使模糊控制规则适用于不同功率的电机、不同大小的负载和转速,引入 P_{db} 作为 P_d 的比例因子,将其实际值转化为标么值形式,其变化区间为 $[-1, 1]$ 。而输出变量 $i_{m1}(k)$ (pu) 的比例因子采用 $i_{mb} = i_{m1-opt}$,将其由标么值转化为实际值,即

$$P_{db} = \max\{ [P_d(nor) - P_d(opt)], [P_d(opt)] \} \quad (2)$$

$$p_d(nor) = R_m(1) i_{m1N}^2 + R_t(1) \left(\frac{T_c}{k_t i_{m1N}} \right)^2 + T_c \quad (3)$$

$$p_d(opt) = R_m(1) i_{m1-opt}^2 + R_t(1) \left(\frac{T_c}{k_t i_{m1-opt}} \right)^2 + T_c \quad (4)$$

式(2)~(4)中,考虑 P_d 在标么化时会因比例因子大小选择不当而出现大于1的情况,从而产生控制“死区”, P_{db} 取 $[P_d(nor) - P_d(opt)]$ 和 $p_d(opt)$ 的最大值。 i_{m1N} 为额定励磁电流, $p_d(nor)$ 和 $p_d(opt)$ 分别对应励磁电流为额定值和最优估计值时的直流侧输入功率。 $R_m(1) i_{m1}^2 + R_t(1) \left(\frac{T_c}{k_t i_{m1}} \right)^2$

为电机总损耗^[2], T_e 代表输出功率,此处忽略了机械损耗、杂散损耗和逆变器损耗。

在考虑功率检测误差、控制精度、控制的快速性和稳定性等因素的情况下,经过多次仿真测试确定了各变量隶属函数,如图 3 所示。值得一提的是,对于 $P_d(\text{pu})$,其隶属函数在 PB 和 NB 区域的重叠率和重叠鲁棒性均较小,因此控制更加灵敏快速,而在 ZE 区设置的“平顶”,可以避免系统在接近效率最优点时出现“振颤”现象。

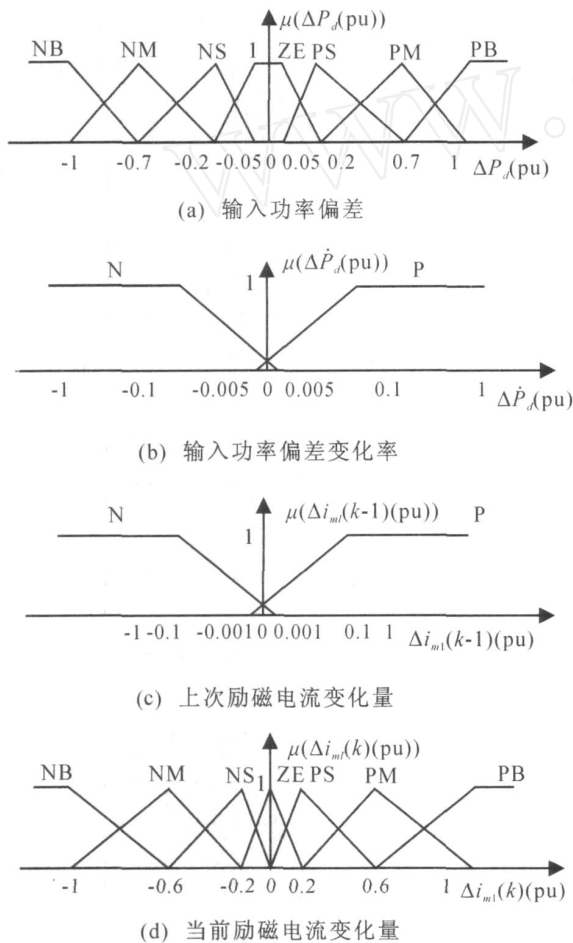


图 3 模糊控制器各变量隶属函数

模糊规则共 21 条,见表 1。输入变量个数(即控制维数)根据输入功率偏差大小来确定。当偏差最大,即 P_d 为 PB 或 NB 时,不考虑 \dot{P}_d ,输入变量有两个,此时以快速减小偏差为主,同时也不失 2 维控制器结构简单的优点。如当 P_d 为 PB 时,即输入功率正偏差明显过大,若此时 $i_{m1}(k-1)$ 为 P,则直接将 $i_{m1}(k)$ 确定为 NB,以快速减小偏差。而其他情况下,则增加 \dot{P}_d 这一输入变量,此时模糊控制器变为三维结构。由功率偏差变化率可以判断出当前功率变化的趋势,这有助于提高系统的稳定性,如当 P_d 为 PM, $i_{m1}(k-1)(\text{pu})$ 为 P, $\dot{P}_d(\text{pu})$ 为 N 时,说明当前功率增加程度正在变缓,此时励磁电流应

该向原来的反向变化,但控制强度应为中等,以避免超调,故 $i_{m1}(k)(\text{pu})$ 取为 NM。当 P_d 为 PM, $i_{m1}(k-1)(\text{pu})$ 为 P, $\dot{P}_d(\text{pu})$ 为 P 时,说明当前功率增加程度正在加剧,此时励磁电流应该向原来的反向变化,且控制强度应为最大,以尽快减小偏差,故 $i_{m1}(k)(\text{pu})$ 取为 NB。

表 1 模糊规则

If		Then
$P_d(\text{pu})$	$\dot{P}_d(\text{pu})$	$i_{m1}(k)(\text{pu})$
PB		NB
PB		PB
PM	P	NB
PM	N	NM
PM	P	PB
PM	N	PM
PS	P	NM
PS	N	NS
PS	P	PM
PS	N	PS
NB		PB
NB		NB
NM	P	PB
NM	N	PM
NM	P	NB
NM	N	NM
NS	P	PM
NS	N	PS
NS	P	NM
NS	N	NS
ZE		ZE

可见,功率偏差变化率 \dot{P}_d 的适时引入,细化了控制规则,将会大大提高效率寻优的稳定性和快速性。

2.2 转矩脉动补偿

如何抑制感应电机的转矩脉动问题一直是研究热点。文献[12]利用混合滑模技术很好地解决了直接转矩控制系统中高频转矩脉动问题。而在感应电机最大效率控制系统中,在效率优化时则存在着由于磁链的变化而引起的低频转矩脉动,由其引起的速度波动对系统性能会造成不良影响。本文采用如下方法对低频转矩脉动进行补偿。

矢量控制下,在稳态时转矩为恒值不变,转矩电流与励磁电流成反比例关系。假设在第 k 次采样周期内,励磁电流和转矩电流的前一时刻值分别为 $i_{m1}^*(k-1)$ 和 $i_{t1}^*(k-1)$,则有

$$[i_{m1}^*(k-1) + i_{m1}^*(k)]/[i_{i1}^*(k-1) + i_{i1}^*(k)] = i_{m1}^*(k-1) i_{i1}^*(k-1). \quad (5)$$

由此得第 k 个采样周期时转矩电流补偿量为

$$i_{i1}^*(k) = \frac{i_{m1}^*(k-1) - i_{m1}^*(k)}{i_{m1}^*(k)} i_{i1}^*(k-1). \quad (6)$$

将式(6)计算出的转矩电流补偿值叠加到由转速调节器输出的转矩电流给定上,就可以抵消由于励磁电流的改变而引起的转矩脉动,从而维持转矩不变.

考虑到转子磁链的变化要受到励磁惯性的阻挠,其变化滞后于励磁电流的变化.因此在按式(6)对脉动转矩进行补偿时,转矩电流补偿量同样要经过一阶惯性环节(时间常数同样为转子时间常数 T_r)的处理.

2.3 转矩的快速响应

感应电机最大效率控制技术本质上都是使电机在轻载时工作在较低的磁链水平上.在轻载运行实施最大效率控制时,若负载转矩或转速指令突然增加,如电动汽车启动、爬坡或突然加速时,由于较低磁链情况下产生最大转矩能力受限,系统动态响应速度会明显低于磁链为额定值时的常规矢量控制,这对动态性能要求较高的电动汽车等装置而言是不允许的.

为了提高动态响应速度,在系统进入动态过程时,要将转子磁链恢复成额定值.有两个问题需要解决:1)如何区分动态和稳态;2)如何使转子磁链快速达到额定值.

系统动态和稳态的区分,一般根据转速的变化量大小进行^[6,7,10],但实际上由于转速的变化受机械惯性的影响,其变化并不能及时地反映系统是否要进入动态过程.相对而言,转矩电流变化量则能较好地胜任这一任务,表示成转矩电流给定量与转矩电流反馈量之差(绝对值形式),即 $i_{i1} = |i_{i1}^* - i_{i1}|$.

为使状态切换稳定,鉴别器采用滞环结构,其基本原理是:当 i_{i1} 接近零时,鉴别器输出为“OFF”,系统工作在稳态,实施最大效率控制;当 i_{i1} 较大,达到设定阈值时,鉴别器输出为“ON”,系统则停止效率控制进入动态快速响应过程.为了使所设定的阈值适用于不同功率的电机,转矩电流变化量采用标么值形式,转矩电流变化量基值 i_{i1b} 选用转矩电流的额定值.

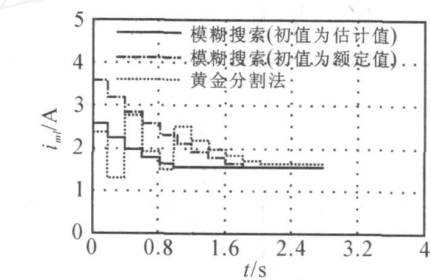
在励磁电流给定为额定值时,为了使电机磁链快速达到额定值,考虑感应电机具有一定的短时过载能力,引入一阶微分环节来克服转子磁场惯性,对电机进行强迫励磁.微分时间常数取为与转子时间常数相等,且仅当系统进入动态过程时,此环节才起

作用.

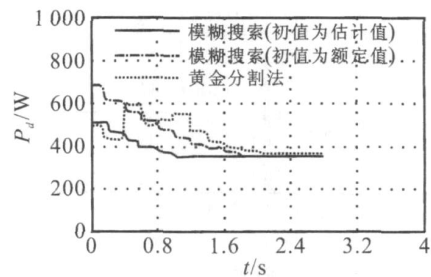
3 仿真结果

本文利用 Matlab/Simulink 对系统进行仿真研究.仿真用感应电机参数为: $P_N = 1.5 \text{ kW}$, $I_N = 6.4 \text{ A}$, $n_N = 1400 \text{ r/min}$, $U_N = 220 \text{ V}$, 接, $T_N = 10 \text{ N}\cdot\text{m}$, $R_1 = 1.1$, $L_r = L_s = 170 \text{ mH}$, $R_2 = 2.0$, $R_{fe} = 98$, $L_{lr} = L_{ls} = 5 \text{ mH}$, $L_m = 165 \text{ mH}$, $J = 0.0318 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,效率控制周期为 200 ms .

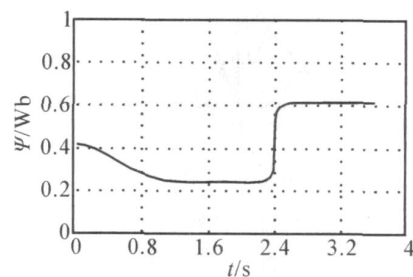
图4为系统仿真波形,图4(a)和(b)反映了在 $\omega_1 = 90 \text{ rad/s}$,负载转矩 $T_L = 2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 情况下,采用不同方法时系统最大效率控制情况.采用常规模糊



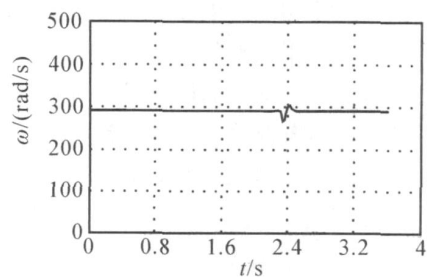
(a) 最优磁链搜索过程



(b) 输入功率变化过程



(c) 转子磁链动态响应



(d) 转速动态响应

图4 仿真波形

搜索技术,搜索初值为额定值,模糊控制器为二维结构,此时用了大约 9 步,用时 1.8 s 将直流侧输入功率控制到最小.若采用本文提出的方法,将损耗模型算出的估计值作为搜索初值,并适时加入输入功率偏差变化率作为模糊控制器的第 3 输入变量.此时控制器搜索范围减小,而且在改变搜索步长时即大胆又准确,整个效率优化过程只需大约 5 步,用时大约 1 s.与常规的模糊搜索法相比,在保证稳定性的情况下,寻优速度大大提高.采用传统的黄金分割法时,磁链搜索区间选为 $[0, 2N]$,搜索终止值取为 $0.01 \cdot 2N$.由于插值点的选取机械地遵循黄金分割规律,搜索过程中磁链出现较大幅度的振荡,这必然会引起速度和转矩的大幅度波动,严重时导致系统无法正常工作.同时搜索速度也较模糊搜索方法慢,整个搜索过程用时 2 s 左右.图 4(c) 和 (d) 反映了系统在 $\omega_1 = 90 \text{ rad/s}$,负载从 $T_L = 2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 突加到 $T_L = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时的动态响应性能.可以看出,由于系统中加入了微分强迫励磁环节,动态时转子磁链很快地从最优值恢复到额定值,速度波动也很小,说明转矩响应是非常迅速的.

4 实验结果

图 5 为现场实验装置.该装置以 TMS320F2812 DSP 为控制核心,逆变电路功率开关器件采用 60A/1200V 的 IGBT,采用增量式光电编码器检测转子速度,与转差频率相加并经积分后可获得转子旋转磁场位置.载波周期和电流采样周期为 $100 \mu\text{s}$,效率控制周期为 200 ms.实验与仿真所用电机相同.

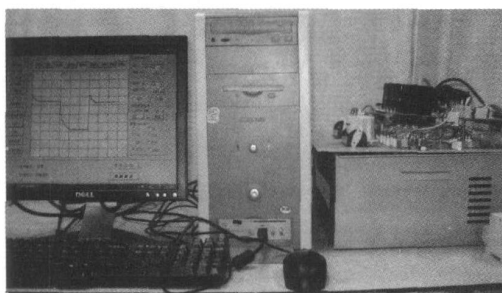
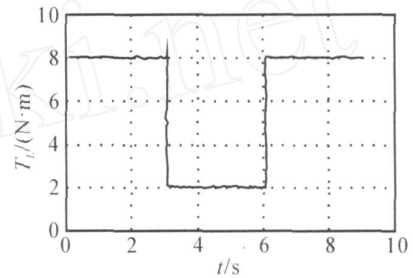


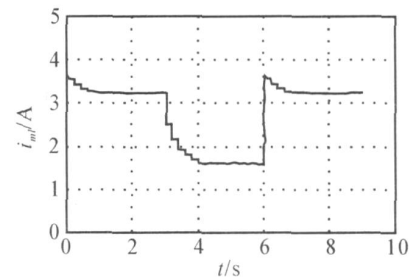
图 5 实验装置

图 6 显示出当负载以方波规律变化的情况下,采用本文方法实施最大效率控制时的励磁电流、输入功率和运行效率的变化情况.当 T_L 由 $8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 减至 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时 ($t = 3 \text{ s}$),模糊效率控制器根据当前转速和负载大小,由式 (1) 计算出当前的励磁电流最优估计值为 2.5 A,并将其作为磁链搜索初值,然后按着表 1 中的模糊规则进行效率寻优.在搜索之初,输入功率偏差较大,为加快搜索速度,搜索步长变化幅度较大.随后输入功率偏差逐渐变小,此时模糊控制器调整为三维结构,将输入功率偏差变化率作为

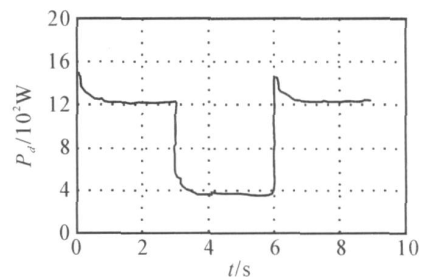
第三输入变量参与控制,以确保效率寻优的稳定性,同时提高搜索速度.最后,系统最优励磁电流稳定在 1.6 A 左右,直流侧输入功率由 $T_L = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时的 1200 W 降至大约 300 W,整个寻优时间仅为 1 s 左右,效率寻优的快速性和稳定性均得到保证.稳态时,无论是重载还是轻载,系统的运行效率均维持在 90% 附近,而在 T_L 突变瞬间,系统效率则下降得比较明显.



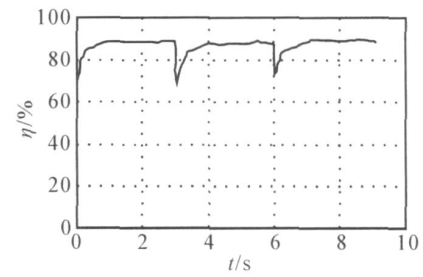
(a) 负载变化曲线



(b) 励磁电流变化曲线



(c) 输入功率变化曲线



(d) 运行功率变化曲线

图 6 实验波形

5 结 论

本文基于模糊技术研究了感应电机最大效率控制问题.所设计的模糊效率控制器,其控制维数可适

时调整,必要时可增加输入功率偏差变化率这一输入变量,而搜索初值则由损耗模型进行选取,使搜索范围大大缩小,提高了搜索速度,同时确保了效率寻优的稳定性.采用前馈补偿方法,抑制了效率控制中产生的低频脉动转矩.状态鉴别器根据转矩电流变化量,采用滞环方法判断系统状态,判断准确、及时、稳定.引入一阶微分环节克服了转子磁场惯性,使动态时转子磁链能够快速恢复到额定值,解决了动态时转矩快速响应问题.该系统尤其适用于电动汽车等对效率和动态性能均有较高要求的装置中.

参考文献(References)

- [1] Lorenz R D. Key technologies for future motor drives [C]. Proc of the 8th Int Conf on Electrical Machines and Systems. Nanjing, 2005: 1-6.
- [2] Lim S, Nam K. Loss-minimizing control scheme for induction motors [J]. IEE Proc of Electric Power Applications, 2004, 151(4): 385-397.
- [3] Kim G K, Ha I J, Ko M S. Control of induction motors for both high dynamic performance and high power efficiency[J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1992, 39(4): 323-333.
- [4] Chakraborty C, Minh C Ta, Uchida T, et al. Fast search controllers for efficiency maximization of induction motor drives based on DC link power measurement[C]. Proc of the Power Conversion Conf. Osaka, 2002, 2: 402-408.
- [5] Cao-Minh Ta, Yoichi Hori. Convergence improvement of efficiency-optimized control of induction motor drives [J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 2001, 37(6): 1746-1753.
- [6] Gilberto C D Sousa, Bimal K Bose, John G Cleland. Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1995, 42(6): 192-198.
- [7] Ramesh L, Chowdhury S P, Chowdhury S, et al. Efficiency optimization of induction motor using a fuzzy logic based optimum flux search controller[C]. Int Conf on Power Electronics, Drives and Energy Systems. New Delhi, 2006: 1-6.
- [8] Jingchuan Li, Longya Xu, Zheng Zhang. A new efficiency optimization method on vector control of induction motors [C]. IEEE Int Conf on Electric Machines and Drives. San Antonio, 2005: 1995-2001.
- [9] Zhang L W, Liu J, Wen X H. A new fuzzy logic based search control for efficiency optimization of induction motor drives[C]. The 7th Int Power Engineering Conf. Toki Messe, 2005, 29: 1-526..
- [10] Durval de Almeida Souza, Wilson C P de Aragall Filho, Gilberto Costa Drumond Sousa. Adaptive fuzzy controller for efficiency optimization of induction motors [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 2157-2164.
- [11] Jie Li, Yan-Ru Zhong. Efficiency optimization of induction machines based on fuzzy search controller [C]. Proc of the 4th Int Conf on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou, 2005, (4): 2518-2533.
- [12] Wu Q H, Shao C. Novel hybrid sliding-mode controller for direct torque control induction motor drives [C]. ACC '2006. Minneapolis, 2006: 2754-2758.

下 期 要 目

- 水下移动无线传感器网络研究综述 吕 超, 等
- 全局稳定的分散自适应神经网络反推跟踪控制 陈为胜, 李俊民
- 一种新的模糊自适应模拟退火遗传算法 彭勇刚, 韦 巍
- 参数不确定的供应链传递函数 H 保成本计算与分析 葛汝刚, 黄小原
- 具有数据包丢失的奇异网络控制系统指数稳定性 邱占芝, 张庆灵
- 基于模糊 T-S 模型的非线性系统的 H 鲁棒容错控制 尹作友, 等
- 空间机器人视觉伺服半物理仿真的原理与实现 徐文福, 等
- 一种实数编码量子进化算法及其收敛性 覃朝勇, 等
- 一种基于变尺度滑动窗口的数据流频繁集挖掘算法 朱小栋, 等