

直接转矩控制系统中感应电机定子电阻模糊观察*

陈其工**

(安徽机电学院 芜湖 241000)

【摘要】 研究了感应电机定子电阻随绕组运行温度变化的规律。基于模糊理论,设计了一种模糊电阻观察器。选用电机绕组端部温度及其时间变化率两个与定子电阻值直接相关的物理量作为模糊观察器的输入量,简化了模糊关系,以提高系统的实时性,利用实验方法总结了模糊控制规则、隶属函数,观察精度可满足直接转矩控制系统的控制要求,为改善系统的低速性能提供了一种有效方法。

关键词 直接转矩控制; 模糊逻辑; 电阻观察; 感应电机

中图分类号 TP11

直接转矩控制是新颖的感应电机调速方法^[1]。控制思想是避开复杂的旋转坐标变换,选择在最直接的定子坐标下对磁链、力矩进行砰—砰控制,系统通过保持定子磁链 Ψ_s 恒定,以对转矩直接进行控制,因此控制性能不受转子参数的影响。但当电机速度较低时,降落于定子电阻 R_1 上的电压会增大,此时忽略 R_1 或认为它是常数,必然造成低速性能变坏,转速脉动。而定子电阻受运行时诸多因素的影响,其变化可达额定值的 $\pm 50\%$ 。为改善系统的低速性能可采用多种方法对定子电阻进行在线观察,但这些方法不同程度存在精度不高或实时性差等问题^[2],其原因是定子电阻值与引起其变化的诸因素之间关系复杂,是一个具有相当程度不确定性的系统。模糊控制是解决不确定系统的有效手段^[3],应用模糊逻辑来设计定子电阻观察器已有多种尝试。如以定子电流及其变化率作为输入变量,采用模糊推理的方法来补偿 R_1 的变化;采用 I_1 、 f_1 及运行时间 t 作为输入来构成 R_1 的在线模糊观察器等,存在的问题是输入变量只是引起 R_1 变化的部分原因,使得观察结果不够理想;或者因采用过多的模糊量作观察器的输入,如三个或四个输入量^[4],从而使观察器过于复杂,实时性差。

1 模糊观察器输入变量的确定

对 R_1 产生影响的物理量是电机电流、运行频率、运行时间及环境温度,电流愈大、频率愈低、环境温度愈高及工作时间愈长,电机温度愈高, R_1 就愈大,但 R_1 难以用解析公式表示。若设计一个四输入的模糊观察器,其控制规则、模糊关系也很难得到,更难以实际应用。

R_1 变化的直接原因是定子绕组温度的变化。若导体在温度 T_1 时的电阻为 R_1 ,而温度达到 T_2 时电阻 R_2 可表示为

$$R_2 = R_1 + R_1 \alpha (T_2 - T_1) \quad (1)$$

式(1)使用的前提是:导体为等温体或已知其温度分布从而可求平均电阻。但电机运行时,绕组不可能是等温体,温度分布也相当复杂。如槽底部温度高于槽口,端部低于铁芯中,风道口相对较低。绕组的温度分布是一个具有时变性、非线性的不确定分布参数系统,而且电机体内也不可能埋置许多温度传感器,无法建立准确的数学模型以求解定子电阻。

绕组温度分布虽不能确定,但绕组端部某点的瞬态温度 T 及其时间变化率 $\Delta T/\Delta t$ 是很容易检测的,以上两个因素与 R_1 的当前值及变化趋势直接相关,虽然无法写出其间的精确函数关系,对于模糊系统来说,在合理地总结模糊控制规则及各模糊子集的隶属函数基础上,便可推理出 R_1 的瞬时值。

用 T 及 $\Delta T/\Delta t$ 作输入量,使模糊观察器简化成二输入的系统,这样在不增加计算工作量的前提下,可将规则划分得细一点,利于提高 R_1 的观察精度。同时可在整个调速范围内采用同一模式控制磁链,

1998年3月22日收稿,1998年12月18日修改定稿

* 安徽省教委科研基金资助项目,基金号:97JL0005

** 男 38岁 硕士 副教授

避免模式切换造成的电流冲击。

2 模糊观察器的设计

2.1 总体方案

观察器的总体结构框图如图1所示,其中虚线框内为脱机计算部分。为了在实时控制中避免进行模糊关系矩阵的合成运算,先要在脱机状态下把所有可能的输入和输出计算出来,然后形成一张控制表存入内存。这样,系统运行时,只要把采样来的输入 T 、 $\Delta T/\Delta t$ (起动瞬间 $\Delta T/\Delta t = 0$),量化到各自语言变量的论域元素上,并以此组合来直接查寻控制表,将结果再乘以量化因子,便可得到 R_1 的在线值。

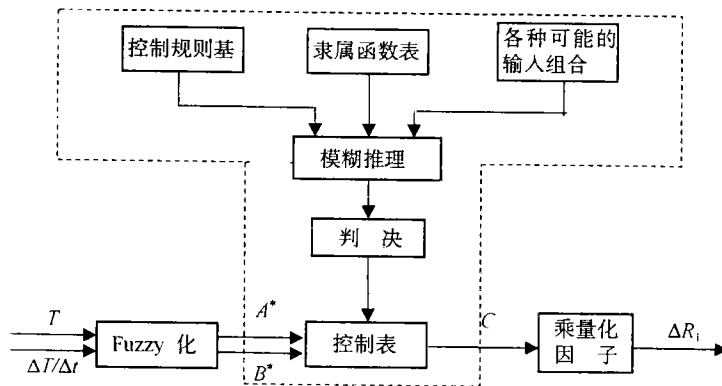


图1 模糊电阻观察器框图

2.2 模糊化及隶属函数的确定

被观察电机参数为:1.5 kW、380 V、3.7 A、 $R_2 = 4.14 \Omega$ 、 $L_m = 0.5589$ 、 $L_{1\sigma} = L_{2\sigma} = 0.042$ 、 $R_1 = 4.51 \Omega$ (换算到 0°C 之值)。输入输出各变量的基本论域确定原则如下:电机绝缘为 B 级,允许最高温度为 120°C ,但端温要略低于绕组最高温度,因此确定 $T = 0 \sim 110^\circ\text{C}$;电机从冷态满负载起动之初,实测 $\Delta T/\Delta t = 2.5^\circ\text{C}/\text{min}$,而在端温接近 110°C 时,突然空载运行, $\Delta T/\Delta t = -2^\circ\text{C}/\text{min}$,所以确定 $\Delta T/\Delta t = -3 \sim 3^\circ\text{C}/\text{min}$;端温恒定在 110°C 时,采用工业测量法^[5]实测 $\Delta R_1 = 2.21 \Omega$,因此 $\Delta R_1 = 0 \sim 2.21 \Omega$ 。要说明的是,电机在额定状态下,多次实测端部温度与环境温度之差,大都在 $56^\circ\text{C} \sim 59^\circ\text{C}$ 之间,为实测 110°C 时各数据,要把风道口封闭。

在模糊推理过程中,要先把各语言变量的基本论域转换成有限整数论域,也就是把连续论域离散化后产生离散论域。本文将 T 、 $\Delta T/\Delta t$ 、 ΔR_1 的连续论域离散后各量化为 25 个等级,其语言变量分别设为 A 、 B 、 C ,对应的模糊子集为: $A_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 、 $B_j (j = 1, 2, \dots, 7)$ 、 $C_k (k = 1, 2, \dots, 7)$,然后确定每个子集的隶属函数。隶属函数的确定有许多方法,实践表明隶属函数呈正态分布对提高模糊控制系统的精度是有益的,即

$$\mu = e^{-k(x-a)^2} \quad (2)$$

式中 a 为各隶属函数的分布中心,按等距原则确定; k 是根据经验假定的某一初值。以实验样本 (T 、 $\Delta T/\Delta t$) 作模糊观察器输入,再依据本文下面建立的规则基进行推理及判决,将结果与实验结果 (ΔR_1) 比较,据此对 k 进行调整;再进行模糊推理、比较等,逐步调整 k 。而得到合理的隶属函数,实验样本要取 T 及 $\Delta T/\Delta t$ 尽可能多的组合,最后得到的 T 的各子集隶属函数的 k 值如表 1 所示,限于篇幅 $\Delta T/\Delta t$ 、 ΔR_1 的隶属函数未列出。

表1 端部温度 T 各子集隶属函数的有关参数

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
0.010 88	0.010 84	0.010 81	0.010 78	0.010 82	0.010 83	0.010 90

表1中, k_1 为语言变量 A 的模糊子集 A_1 的隶属函数参数, k_2 为 A_2 隶属函数参数,以此类推。

2.3 模糊控制规则的确定

许多工程问题的模糊控制规则完全是经验的总结,但控制规则仅靠经验来设计是不行的,而是从实验结果中总结出来的。实验时用变频器供电被测电机,通过加不同的负载,采用起动、突然加减载、变频运行、堵风道等方法来得到不同的 T 与 $\Delta T/\Delta t$ 组合。有意识测取 T 与 $\Delta T/\Delta t$ 在各自子集隶属度为 1 的论域组合及对应的 R_1 ,再查 ΔR_1 的隶属函数表,找出对应最大隶属度的 ΔR_1 的子集,即可总结出一条模糊规则。如当 $T = 56.4^\circ\text{C}$, A_4 的隶属度为 1, $\Delta T/\Delta t = 0.84^\circ\text{C}/\text{min}$, B_5 的隶属度为 1, 此时实测 $R_1 = 5.6$, $\Delta R_1 = 1.09 \Omega$, 对应最大隶属度的子集为 C_4 , 由这组实验结果总结出一条规则:

$$\text{if } A = A_4 \text{ and } B = B_5 \text{ then } C = C_4 \quad (3)$$

最后总结的规则基如表2所示,共39条,空格表示不存在或不允许存在的 T 及 $\Delta T/\Delta t$ 组合。实测时当 $T > 110$ °C 应断电或减载。

2.4 控制表的求取

若执行模糊推理,在计算机中必须以一定的算法实现,本文采用工程上应用最广泛的CRI法^[6]求控制表,其方法如下:依次取39条规则中的每一条,设为如下形式

$$\text{if } A = A_i \text{ and } B = B_j \text{ then } C = C_k \quad (4)$$

式(4)蕴含的模糊关系 R_{ij} 是该条规则中各语言变量的直积,即

$$R_{ij} = A_i \times B_j \times C_k \quad (5)$$

设任意输入量 $T, \Delta T/\Delta t$ 经量化后对应的模糊量为 A_L^*, B_M^* , 不论其离散后的论域等级为多少,只会对应其中一个等级,即必有如下形式

$$\begin{cases} A_L^* = (\frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \dots + \frac{1}{L} + \dots + \frac{0}{25}) \\ B_M^* = (\frac{0}{1} + \frac{0}{2} + \dots + \frac{1}{M} + \dots + \frac{0}{25}) \end{cases} \quad (L, M = 1, 2, \dots, 25) \quad (6)$$

式中 $+$ 表示并。

对输入 (A_L^*, B_M^*) , 利用式(5)推理的结果为

$$C_{ij}^*(N) = (A_L^* \times B_M^*) R_{ij} \quad N = 1, 2, \dots, 25 \quad (7)$$

同理,对同一输入,依据每一条控制规则,采用上述方法,均可得到一个对应的结果。将全部39个推理结果采用Mamdani多输入多规则法进行合成为

$$C^*(N) = \bigvee_{i,j} C_{ij}^*(N) \quad (8)$$

式中 \bigvee 表示取并。最后采用重心法求模糊判决,得

$$C = \frac{\sum_{N=1}^{25} C^*(N) N}{\sum_{N=1}^{25} C^*(N)} \quad (9)$$

式中 C 是在输入 (A_L^*, B_M^*) 条件下经模糊推理得到的整数论域中 ΔR_1 精确输出量。同理,每次改变 A_L^*, B_M^* 的 L 和 M 组合,经上述推理、判决,可得到一个相应的精确输出。将所有可能的 A_L^*, B_M^* 组依次作为输入,可推理出全部控制表。当然,有些组合,如 (A_1^*, B_1^*) 是不合理的,也可以得到一个推理结果,但该结果也是不合理的,系统运行时也不会去查这个结果。由于所求控制表中元素个数是 25×25 , 过于庞大,本文只给出局部,如表3所示。

表3 控制表局部(整数论域中输入量 A_L^*, B_M^* 与输出量 C 对应关系)

A_L^*	B_M^*										
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	9.35	9.38	9.40	9.42	9.50	9.58	9.63	9.72	9.80	9.88	9.96
11	10.28	10.33	10.40	10.47	10.54	10.59	10.65	10.72	10.75	10.81	10.89
12	11.30	11.33	11.37	11.41	11.48	11.57	11.62	11.69	11.76	11.84	11.91
13	12.27	12.34	12.38	12.46	12.52	12.58	12.64	12.70	12.73	12.78	12.84
14	13.29	13.32	13.38	13.45	13.53	13.59	13.68	13.72	13.82	13.89	13.95

表2 控制规则表

T	$\Delta T/\Delta t$						
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7
A_1				C_1	C_1	C_1	C_2
A_2		C_1	C_2	C_2	C_2	C_2	C_3
A_3	C_2	C_2	C_3	C_3	C_3	C_3	C_4
A_4	C_3	C_4	C_4	C_4	C_4	C_4	C_5
A_5	C_4	C_5	C_5	C_5	C_5	C_5	C_5
A_6	C_5	C_6	C_6	C_6	C_6		
A_7	C_6	C_7	C_7	C_7			

考虑到量化因子 K_R (本文 $K_R = \frac{2.21}{25}$)

$$\Delta R_1 = K_R C \quad (10)$$

3 实测与结论

为了检验观察器误差,用变频器供电被测电机,采用工业实验实测了大量数据(T 、 $\Delta T/\Delta t$ 、 R_1),并用 T 、 $\Delta T/\Delta t$ 实测值作为本观察器输入,推理出的 R_1 与工业实验所测结果误差均在 5% 以内。根

据文献[3]的研究,在直接转矩系统运行时,若观察值 R_1 与实际瞬时值误差小于 5%,根据此观察值对定子电压进行偏差补偿,调速系统的性能可接近电压完全补偿的理想动、静态特性。仿真计算表明,系统的动、静态特性明显优于 R_1 为恒值的系统。同时,把模糊理论与神经网络结合使用,以便寻求更合理的隶属函数与控制规则基,由于输入量的检测更为方便,系统将具有更好的实时性,进一步提高电阻的在线检测精度。

表4 实测与观察结果

$T/^\circ\text{C}$	$\Delta T/\Delta t$ $/^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$	实测 R_1/Ω	观察 R_1/Ω
42.3	0.90	5.35	5.37
47.1	0.65	5.47	5.45
50.9	0.4	5.53	5.54
56.3	0.82	5.64	5.63
60.1	-0.71	5.66	5.68
83.1	0.11	6.16	6.14

参 考 文 献

- 1 Depenbrock M. Direct self control of inverter - fed induction machines. IEEE Trans on PE, 1998, PE - 3(4): 420 ~ 429
- 2 严 青, 万淑芸, 张晓光等. 直接转矩控制中几个关键问题探讨. 中国第四届交流电机调速传动学术会议论文集. 大连, 1995, 238 ~ 242
- 3 Mir Sapsed A, Zinger Donald S, Elbuluk Malik E. Fuzzy controller for inverter fed induction machines. IEEE Trans On IA, 1994, 30(1): 186 ~ 192
- 4 胡 钢, 胡育文, 许 越等. 直接转矩控制系统的模糊在线观察器设计. 电气传动, 1997, 27(1): 21 ~ 25
- 5 冯雍明, 电机的工业实验. 北京: 机械工业出版社, 1990, 41 ~ 59
- 6 余永权, 曾 碧. 单片机模糊逻辑控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995, 145 ~ 147

Fuzzy Observation for Stator Resistance of An Induction Motor in A Direct Torque Control System

Chen Qigong

(Anhui Institute of Mechanical and Electrical Engineering Wuhu 241000)

Abstract The variation pattern in the stator resistance of an induction motor with the coil temperature is investigated. One kind of fuzzy observers, based on fuzzy logic and for measuring instantaneous resistance is introduced. The two variables, T and $\Delta T/\Delta t$, measured at the coil ends and directly related to the stator resistance are selected as the input of fuzzy observer to simplify the fuzzy relations. Thus the real-time property of the system will be improved. The fuzzy control rules and membership functions are obtained by analyzing the experimental results. The observing accuracy can meet the requirement for the direct torque control system. It is proved to be an effective way to improve the low-speed performance of the system. The results, observed and gained through experiments are compared in the later part.

Key words direct torque control; Fuzzy-logic; induction motor; resistance observation