文章编号:1000-8152(2008)01-0053-04

无刷双馈电机的PID神经网络控制

郭红霞,杨金明,刘文刚

(华南理工大学电力学院,广东广州 510640)

摘要:无刷双馈电机(BDFM)兼有笼型、绕线型感应电机和电励磁同步电机的共同优点,在电气传动和风力发电中具有很好的应用前景.由于无刷双馈电机两套绕组形成的复杂空间耦合关系,使得基于模型的控制方法异常复杂,为此设计了一种PID神经网络(PIDNN)的无刷双馈电机的控制方法,经过训练的PID神经网络控制器能够实现准确的转速跟踪,且有较好的动态特性,仿真结果验证了这种控制方法的有效性.

关键词:无刷双馈电机; PID神经网络控制; 转速控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

PID neural network control of brushless doubly-fed machine

GUO Hong-xia, YANG Jin-ming, LIU Wen-gang

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Brushless doubly-fed machine (BFDM) possesses the common advantages of squirrel-cage induction machine, wire wound induction machine and electromagenetic synchoronous machine. Therefore, it has a good prospect for application in AC drive and wind generating. Because of the complicated spatial coupling characteristics of BFDM between the two windings, the control methods based on the model of BFDM are very complicated. A PID neural network controller (PIDNN) is designed and applied to the speed regulation of BFDM. The exact speed-tracking is then realized by PIDNN controller after training. The dynamics is satisfactory. Finally, the simulaiton result validates the feasibility and effectiveness of this method.

Key words: brushless doubly-fed machine; PID neural network control; speed control

 PM_p

1 引言(Introduction)

无刷双馈电机(BDFM)实际上是一类交流励磁异 步化同步电机,由自级联调速电机发展而来.无刷双 馈电机作为一种新型电机,从根本上解决了无刷化 问题,结构特殊,运行机理异于传统电机,同时,该类 电机兼有笼型、绕线式感应电机和电励磁同步电机 的共同优点.通过简单的改变控制绕组的联接与馈 电方式,可以方便地实现自起动、异步、同步和双馈 等多种运行方式,使其既具有良好的起动特性,又具 有良好的运行性能.该种电机的研究和开发在高性 能的交流调速传动和变速恒频发电领域具有广阔的 应用前景^[1].因此得到了广泛的关注^[2~5].

2 无刷双馈的电机模型(Model of BDFM) 无刷双馈电机的*d* - *q*轴模型可表示如下:

 $r_p + PL_{sp} = P_p \omega_r L_{sp}$ 0 0 PM_p $P_p \omega_r M_p$ u_{qp} i_{qp} $-P_p\omega_r M_p$ u_{dp} $-P_p\omega_r L_{sp} r_p + PL_{sp}$ 0 0 PM_p i_{dp} $r_c + PL_{sr} P_c \omega_r L_{sc}$ 0 0 $-PM_c$ $P_c \omega_r M_c$ i_{qc} u_{qc} (1)_ 0 0 $-P_c\omega_r L_{sc} r_c + P L_{sr} P_c\omega_r M_c$ PM_c i_{dc} u_{dc} PM_p 0 $-PM_c$ 0 $r_r + PL_r$ u_{qr} 0 i_{qr}

 PM_c

0

通过变换,方程可写成下面的形式:

 u_{dr}

$$V_{qd} = Ri_{dq} + Gi_{qd} + LPi_{qd}.$$
 (2)

0

其中:

0

$$V_{da} = [u_{ap} \ u_{dp} \ u_{ac} \ u_{dc} \ 0 \ 0]^{\mathrm{T}},$$

 i_{dr}

 $r_r + PL_r$

收稿日期: 2007-09-11; 收修改稿日期: 2007-09-30. 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60534040).

$$i_{dq} = \begin{bmatrix} i_{qp} & i_{dp} & i_{qc} & i_{dc} & i_{qr} & i_{dr} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

电磁转矩为

$$T_e = M_p P_p(i_{qp}i_{dr} - i_{dq}i_{qr}) + P_c M_c(i_{qc}i_{dr} + i_{dc}i_{qr}).$$
(3)

电机运动方程为

$$J_p(\omega_r) = T_e - T_L. \tag{4}$$

式中: p为微分算子; Pp,Pc为功率绕组和控制绕组 的极对数; u_{qp} , u_{dp} , i_{qp} 为功率绕组电压和电流 的d,q分量; u_{qc} , u_{dc} , i_{qc} 为控制绕组电压和电流 的d,q分量; u_{qr} , u_{dr} , i_{qr} , j_{dr} 为转子绕组电压和电流 的d,q分量; r_p , r_c , r_r 为功率绕组、控制绕组、转子 绕组电阻; L_{sp} , L_{sc} , L_r 为功率绕组、控制绕组、转 子绕组全电感; M_p , M_c 为功率绕组、控制绕组与转 子绕组的互感; ω_r 为转子机械角速度; T_e 为电磁转 矩; T_L 为负载转矩.

3 无刷双馈电机的PIDNN控制(PIDNN control of BDFM)

PIDNN是一种多层前向网络,它的独特之处 是隐含层由比例(P)神经元、积分(I)神经元和微 分(D)神经元组成.这些神经元的输入--输出函数 分别为比例、积分、和微分函数,即不仅有静态非 线性映射功能,还可处理动态信息,因此它同时具 有神经元网络和PID控制的优点,克服了传统控制 方法和一般神经元网络的缺点,PIDNN在各种类 型的控制系统中作为控制器,已表现出良好的性 能^[6~9].

到目前为止,不少传统的控制策略经过改进后 都可应用于无刷双馈电机中.但从目前的研究来 看,都存在着算法复杂,参数整定的技术难度大, 计算量大,投入到实际的应用中时难度大,成本高, 或在实际应用中效果不理想等诸多问题,针对这 种情况,本文将PIDNN控制运用到无刷双馈电机 的转速控制,图1为控制原理图.



图 1 无刷双馈电机PID神经网络控制框图 Fig. 1 PIDNN control block diagram of BDFM

3.1 前向算法(Forward algorithm)

1) 输入层.

$$x_{si}(k) = u_{si}(k). \tag{5}$$

上式中: s为子网的序号(s = 1, 2), u_{si} (i = 1, 2)为 输入层神经元的输入值, x_{si} (i = 1, 2)为输入层神 经元的输出值, i为子网输入层的序号.

2) 隐含层. 隐含层包含6个神经元, 分别为2个 比例元、2个积分元和2个微分元, 它们各自的输入 均为

$$u'_{sj}(k) = \sum_{i=1}^{2} \omega_{sij} x_{si}(k).$$
 (6)

比例元:

$$x'_{s1}(k) = u'_{s1}(k). (7)$$

微分元:

$$x'_{s2}(k) = x'_{s2}(k-1) + u'_{s2}(k).$$
 (8)

积分元:

$$x'_{s3}(k) = u'_{s3}(k) - u'_{s3}(k-1).$$
(9)

比例元、积分元和微分元的输入--输出特性都具有 上下限幅,上限为+1,下限为-1,即

$$\lim_{u \to \infty} x(u) = +1, \lim_{u \to -\infty} x(u) = -1.$$
(10)

式(7)~(10)中为子网的序号(s = 1, 2), j为子网中 隐含层神经元序号(j = 1, 2, 3), $x_{si}(k)$ 为输入层神 经元的输出, ω_{sij} 为输入层至隐含层的连接权值, 有上标"/"的变量表示隐含层变量.

3) 输出层.

PID神经网络的输出层包含两个神经元,完成 网络的总和输出功能,其输入为

$$u_h''(k) = \sum_{s=1}^2 \sum_{j=1}^3 \omega_{sij}' x_{sj}'(k).$$
(11)

输出层神经元的输入--输出函数为上下限幅的单位比例函数,输出*x*''_h(k)为

$$x_h''(k) = \begin{cases} 1, & u_h''(k) > 1, \\ u_h''(k), & -1 \leqslant u_h''(k) \leqslant 1, \\ -1, & u_h''(k) < 1. \end{cases}$$
(12)

式(11)和(12)中h为输出层神经元序号(h = 1, 2), s为子网的序号(s = 1, 2), j为子网中隐含层神经 元序号(j = 1, 2, 3), $x'_{sj}(k)$ 为隐含层各神经元输 出值, ω'_{sjh} 为隐含层至输出层的连接权值有上标 """的变量表示隐含层变量. 3.2 反传算法(Reverse transition algorithm)

PID神经元网络学习的目标是使J最小,

$$J = \sum_{h=1}^{2} E_{h} = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^{2} \sum_{k=1}^{m} [r_{h}(k) - y_{k}]^{2} = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^{2} \sum_{k=1}^{m} e_{h}^{2}(k).$$
(13)

式中: *m*为批采样点数,*h*为输出层神经元序号 (*h*=1,2). 按梯度法调节PID神经元网络权值, 经 步训练和学习的权值分别由以下各式确定:

1) 隐含层至输出层.

隐含层至输出层的权值迭代公式为

$$\omega'_{sjh}(n_0+1) = \omega'_{sjh}(n_0) - \eta'_{sjh} \frac{\partial J}{\partial \omega'_{sjh}}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \omega'_{sjh}} = -\frac{2}{m} \sum_{k=1}^{m} [r_h(k) - y_h(k)] x'_{sj}(k).$$
(15)

2) 输入层至隐含层.

输入层至隐含层的权值迭代公式为

$$\omega_{sjh}(n_0+1) = \omega_{sjh}(n_0) - \eta_{sjh} \frac{\partial J}{\partial \omega_{sjh}}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \omega_{sjh}} = -\frac{2}{m} \sum_{h=1}^{2} \sum_{k=1}^{m} [r_h(k) - y_h(k)] \omega'_{sjh} \cdot \operatorname{sgn} \frac{y_{h+1}(k+1) - y_h(k)}{v_h(k) - v_h(k-1)} \cdot \operatorname{sgn} \frac{x'_{sj}(k) - x'_{sj}(k-1)}{u'_{sj}(k) - u'_{sj}(k-1)} x_{si}(k).$$
(17)

式中: s为子网的序号(s = 1, 2),i为子网输入层序 号,j为子网中隐含层神经元序号(j = 1, 2, 3),h为 输出层神经元序号(h = 1, 2); $x_{si}(i = 1, 2)$ 为输入 层神经元的输出值, $x'_{sj}(k)$ 为隐含层各神经元输 出值; ω_{sij} 为输入层至隐含层的连接权值, ω'_{sjh} 为 隐含层至输出层的连接权值;上标"'"表示隐含 层,上标"'"

3.3 仿真((Simulation)

本文利用MATLAB/Simulink对P1D神经网络 控制的无刷双馈电机调速系统进行仿真研究,电 机参数如表1所示,PIDNN的初始权重值如2所示.

表1	无刷双馈电机参数
Tabla 1	Parameters of RDFM

Idole 1	I didiletters of DDI M		
$P_p = 3$	$L_{sp} = 80 \mathrm{mH}$	$M_p = 0.89 \mathrm{mH}$	
$r_p = 0.81 \Omega$	$P_c = 1$	$L_{sc} = 630 \mathrm{mH}$	
$M_c = 4.3 \mathrm{mH}$	$r_c = 0.81\Omega$	$L_r = 0.04 \mathrm{mH}$	
$r_r = 1.57 \mathrm{m}\Omega$	$f_p = 50 \mathrm{Hz}$	$f_c = 10 \mathrm{Hz}$	

PID神经网络按照反传算法进行自学习,学习步长为0.02,每步采样点数m=700,共学习12步.

图2分别给出了无刷双馈电机在开环、给定初始 权值的PID神经网络控制下和经过训练学习后 的PID神经网络控制下双馈运行方式的转速跟踪 波形,开环控制的过渡过程较长,且有较大的振荡, 给定初始权值的PID神经网络控制由于初始值的 选定非优化,也存在过渡时间长和振荡的缺陷,而 经过训练后的PID神经网络控制则有较为平滑的 过渡过程和准确的跟踪精度.

表 2 PIDNN的初始权重值

Table 2 Original weight of PIDNN

$\omega_{111}' = -0.6$	$\omega_{121}' = -0.2$	$\omega_{131}' = -5$
$\omega_{112}' = -0.6$	$\omega_{122}' = -0.2$	$\omega_{132}' = -5$
$\omega_{211}' = -0.6$	$\omega_{221}' = -0.2$	$\omega_{231}' = -5$
$\omega_{212}' = -0.6$	$\omega_{222}' = -0.2$	$\omega_{232}' = -5$
$\omega_{111} = 1$	$\omega_{121} = -1$	$\omega_{112} = 0.3$
$\omega_{122} = -0.3$	$\omega_{113} = 1$	$\omega_{123} = -1$
$\omega_{211} = 1$	$\omega_{212} = -1$	$\omega_{213} = 0.3$
$\omega_{221} = -0.3$	$\omega_{222} = 1$	$\omega_{223} = -1$



4 结论(Conclusions)

无刷双馈电机双绕组结构和复杂的空间耦合 非线性特性,对其控制方法提出了特殊要求,为了 兼顾性能要求和控制器的可实现性,本文将PID神 经网络控制策略应用于无刷双馈电机的转速控制 中,仿真结果表明,无刷双馈电机实行PID神经网 络控制可实现转速的准确跟踪并具有较好的动态 特性.

参考文献(References):

- 张彦锋,潘再平,章玮,等. 无刷双馈电机的研究及应用前景[J]. 机 电工程, 1998, 15(6): 55 – 60.
 (ZHANG Yanfeng, PAN Zaiping, ZHANG Wei, et al. The study and application vista of the doubly-fed of brushless machine[J]. *Mechanical Electrical Engineering Magazine*, 1998, 15(6): 55 – 60.)
- [2] 黄守道, 王耀南, 等. 无刷双馈电机转子磁场定向制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(2): 34-39.

[3] WILLIAMSON S, FERREIA A C, WALLACE A. Generalised theory of the brushless doubly-fed machines, Part 1: analysis[J]. *IEEE Proc Electr Power Appl*, 1996, 144(2): 111 – 122.

of China Electrotechnical Society, 2002, 17(2): 34-39.)

- [4] WILLIAMSON S, BOGER M S. Impact of inter-bar current on the performance of the brushless doubly fed motor[J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 1999, 35(2): 435 – 460.
- [5] 张风阁, 王风翔, 王正. 不同转子结构无刷双馈电机稳态运行特性的对比实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 52 55. (ZHANG Fengge, WANG Fengxiang, WANG Zheng. Comparative experiment study on the performance of doubly-fed brushless machine with different rotor structures[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(4): 52 – 55.)
- [6] 舒怀林. PID神经网络对强关联带时延多变量系统的解耦控制[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(6): 920 – 924.
 (SHU Huailin. PID neural network for decoupling control of strong coupling multivariable time-delay systems[J]. *Control Theory & Applications*, 1998, 15(6): 920 – 924.)
- [7] SHU Huailin. PID neural network control for complex systems[C]//Proc of the Int Conf on Computational Intelligence for

(上接第46页)

以及相应的未知参数估计的自适应律:

$$\begin{pmatrix}
\dot{\hat{\theta}}_{j1} = \sigma_{j1,n+1-j} = \sum_{i=1}^{n+1-j} \tau_{j1i} z_{i+j-1}^{p+1}, \\
\dot{\hat{\theta}}_{j2} = \sigma_{j22} = \tau_{j21} z_j^{p+1} + \tau_{j22} z_{j+1}^{p+1}, \\
\dot{\hat{\theta}}_{n2} = \tau_{n21} z_n^{p+1},
\end{cases}$$
(A37)

其中 $j = 2, 3, \dots, n-1$. 因在前面已经约定 $z_{n+1} = 0$, 所 以实际控制(A36)和自适应律(A37)使得

$$\dot{V}_n \leqslant -\sum_{i=1}^n \frac{|d_i|}{2^{n-i}} z_i^{p+1}.$$
 (A38)

Modeling, Control and Automation (ICCI'99). Vienna, Austria: IOS Press, 1999: 166 – 171.

- [8] SHU Huailin, PI Youguo. PID neural networks for time-delay systems[C]//Proc of the 7th Symposium on Process Systems Engineering(SPSE'2000). Keystone, Colorado, USA: [s.n.], 2000: 859 – 862.
- [9] 舒怀林. P1D神经元网络多变量控制系统分析[J]. 自动化学报, 1999, 25(1): 105 – 111.
 (SHU Huailin. Analysis of PID neural network multivariable control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 1999, 25(1): 105 – 111.)

作者简介:

郭红霞 (1982—), 女, 华南理工大学电力学院硕士研究生, 目前正从事电力电子与电力传动研究;

杨金明 (1962—),男,博士,华南理工大学电力学院副教授,目前从事控制理论及其电气传动在新能源中的应用, E-mail:jmyang@scut.edu.cn;

刘文刚 (1981—)男,华南理工大学电力电子与电力传动专业 硕士研究生,研究方向为能源与动力系统中的电力电子技术及控制, E-mail: wengangliu123@163.com.

至此,控制器设计过程完毕.

作者简介:

孙宗耀 (1979—), 男, 2002 年获聊城大学数学系学士学位, 2005 年获曲阜师范大学运筹学与控制论专业硕士学位, 现为山东大学控 制科学与工程学院博士研究生, 主要研究方向是非线性控制、自适应 理论等, E-mail: sunzongyao@sohu.com;

刘允刚 (1970—), 男, 现为山东大学控制科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要研究领域为随机控制、非线性系统分析、自适应控 制等, E-mail: lygfr@sdu.edu.cn.

(上接第52页)

[12] XIE X L, BENI G. A validity measure for fuzzy clustering[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(8): 841 – 847.

作者简介:

袁小芳 (1979—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能控制

理论与应用、神经网络、优化计算等, E-mail: yuanxiaof@21cn.com;

王耀南 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能 控制理论与应用、模式识别与图像处理等, E-mail: yaonan@hnu.cn;

吴亮红 (1978—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能优化 算法理论与应用、智能机器人等, E-mail:lhwu@hnust.edu.cn.