

文章编号:1000-582X(2005)11-0065-04

## 用BP网进行变速风力发电机组控制分析\*

张新燕<sup>1,2</sup>,王维庆<sup>2</sup>,程静<sup>2</sup>

(1.西安交通大学电气工程学院,陕西西安 710049;2.新疆大学电气工程学院,新疆乌鲁木齐 830008)

**摘要:**传统的控制需要精确的风力发电机的数学模型,而因为空气动力学的不确定性和电力电子的复杂性,使风力机系统精确模型难以建立,特别是在风速突变以及有扰动存在时,风力机的控制和分析很复杂;为了克服这一困难,用神经网络对变速风力发电机组进行控制;设计功率系数曲线的BP网模型及最佳桨距角的BP网模型,在低风速时跟随风速获得最大功率系数,高风速时保持功率最大并在允许范围内.在MATLAB环境下给出了用BP网对变速风力发电机控制的仿真模型和仿真结果,显示采用神经网络控制器控制有很好的抗风速突然波动的作用,能有效地抑制扰动.

**关键词:**变速风力发电机组;神经网络控制;仿真

**中图分类号:**TP212

**文献标识码:**A

发电机组的控制主要是对风轮转速和输入功率的控制,与恒速风力发电机组相比,对变速风力发电机组的控制主要是在低风速时能够根据风速变化在运行中保持最佳叶尖速比以获得最大风能,而在高风速时利用风轮转速变化储存或释放部分能量以提高传动系统的柔性,使功率输出更加平稳.传统的控制如PID控制需要精确的风力发电机的数学模型,而因为空气动力学的不确定性和电力电子的复杂性,使风力机系统精确模型难以建立,特别是在风速突变以及有扰动存在时,风力机的控制和分析很复杂,采用模糊控制虽然可以克服这一困难,但是控制经验的获得也相当麻烦;为了更好地解决风力机控制问题,用神经网络对变速风力发电机组进行控制.人工神经网络是一个并行和分布式信息处理网络结构,它从结构、实现机理等功能上对生物神经网络进行模拟和近似. BP网是一种信息从输入层经过若干隐层到输出层传递的前馈神经网络,其连接权的调整采用反向传播学习算法. BP网具有插值功能可以实现从输入到输出的任意非线性映射. 笔者利用

BP网对风轮的桨距角进行寻优,用另一个BP网对风能利用系数即功率系数进行学习,以达到对变速风力发电机组的控制.

### 1 变速风力发电机组简介

#### 1.1 变速风力发电机组变速机理与控制策略

与恒速风力发电机组相比,变速风力发电机组在低风速时能够根据风速变化在运行中保持最佳叶尖速比以获得最大风能,而在高风速时利用风轮转速变化储存或释放部分能量以提高传动系统的柔性,使功率输出更加平稳. 变速风力发电机组的控制主要通过2个阶段来实现. 虽然从理论上,风轮角速度可以跟随风速作任意变化,但是由于机械等原因风轮角速度受到限制,所以在风速低于一定值时,需要保持功率系数恒定,即风轮转速跟随风速变化. 所以设计中在额定风速以下时,主要是调节发电机反力矩使转速跟随风速变化,以获得最佳叶尖速比,此时可以作为跟踪问题处理. 在更高的风速下,风力发电机组受到机械与电气方

\* 收稿日期:2005-07-18

基金项目:国家863基金资助项目(2001AA512010-1-3)

作者简介:张新燕(1964-),女,新疆伊犁人,新疆大学副教授,西安交通大学博士研究生,从事智能控制与电气控制系统的优化研究.

面的限制要求转子的转速和输出功率维持在限定值以内. 所以设计中在高于额定风速时, 主要通过变桨距系统改变桨叶桨距来限制风力机获取能量, 使风力发电机组功率保持在额定值以下发电, 并使系统失速负荷最小化. 控制任务主要是通过调节风机的功率系数, 将输出功率限制在允许范围内. 同时使风力发电机转速能随功率的输入作快速变化, 从而使发电机在允许速度范围内持续工作并保持传动系统良好的柔性. 可以将变速风力发电机组作为一个连续的随机的非线性多变量系统考虑<sup>[1]</sup>.

### 1.2 变速风力发电机常规控制的缺点

由于风力机可获得的能量和风速的立方成正比, 所以在输入量(风)大幅度快速变化时, 要求控制增益也随之改变, 通常用工业标准的 PID 控制器. 虽然, 对某些特定的风力发电机, PI 控制器有一定的优越性; 但是 PI 控制器设计通用性略差, 在确定控制增益时需要反复调试, 且 PI 控制器一般只能用于电输入点输出模式. 在自适应控制中, 通过测量系统的输入输出值, 实时估计出控制过程中的参数, 因此控制中的增益是可以调节的. 在遇到干扰和电网不稳定时自适应控制与具有固定增益的 PI 控制器相比有许多优点, 但是实时参数的估计是其主要的一个缺点; 即采用自适应控制技术由于每一步的计算量都远远超过简单 PI 控制器, 所以用户需要增加额外的设备及开发费用, 其实用性还在进一步的探讨中; 而自适应控制的另一个缺点是它依靠参考模型, 而建立一个确切的参考模型相当困难<sup>[2]</sup>.

## 2 变速风力发电机组神经网络控制设计

### 2.1 BP 网简介

人工神经网络是以工程技术手段来模拟人脑神经网络结构和特征的系统. 分前馈神经网络与反馈神经网络, BP 网是一种误差信息反向传播的前馈网, BP 网的基本神经元的激活函数必须处处可微, 一般取 S 型函数如: 对数与正切函数, 或者取线性函数; BP 网基本计算分 3 部分<sup>[3]</sup>.

1) 输出计算. 隐节点的输出为:  $y_i = f(\sum_j w_{ij}x_j - \theta_j)$ , 其中  $x_j$  为输入;  $w_{ij}$  为连接权;  $\theta_j$  为域值. 输出节点的输出为:  $O_i = f(\sum_j T_{ij}y_j - \theta_i)$ , 其中  $T_{ij}$  为连接权;  $\theta_i$  为域值.

2) 隐节点到输出节点间的修正. 所有样本误差为:  $E = \sum_{k=1}^P (\sum_{i=1}^n |t_i^{(k)} - O_i^{(k)}|)$ , 其中  $P$  为样本数;  $n$  为输出节点数;  $t_i$  为输出节点的期望输出. 权修正值为:  $T_{ii}(k+1) = T_{ii}(k) + \eta\delta_i y_i$ , 其中误差为:  $\delta_i = (t_i - O_i) \cdot O_i \cdot (1 - O_i)$ ; 域值修正为:  $\theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \eta'\delta'_i$ .

3) 输入节点到隐节点的修正. 权修正值为:  $w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \eta'\delta'_i x_j$ , 其中误差为:  $\delta'_i = y_i(1 - y_i) \sum_j \delta_j T_{ji}$ ; 域值修正为:  $\theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \eta'\delta'_i$ .

### 2.2 MATLAB 环境下 BP 网结构及设计中用到的函数

基本的神经元模型如图 1 所示, 神经元输入个数为  $R$ , 各输入通过适当的连接权  $w$  与神经元相连, 神经元的输出为  $a = f(w * p, b)$ ,  $b$  为域值;  $f$  为激活函数.

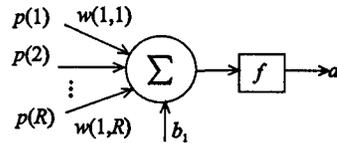


图 1 基本神经元模型

MATLAB 环境下 BP 网隐层中的神经元用 S 型变换函数, 输出层采用纯线性变换函数. 图 2 所示为一个隐层的 BP 网结构.

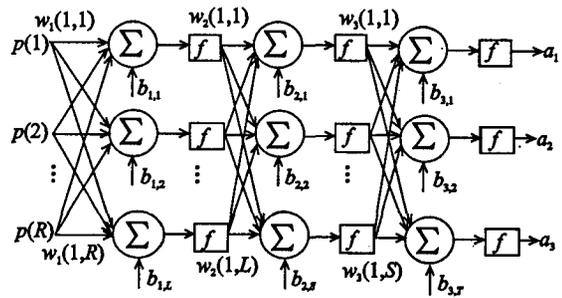


图 2 MATLAB 环境下具有一个隐层的 BP 网结构

其中, 输入层、隐层及输出层的连接权分别为:  $w_1(L, R)$ 、 $w_2(L, S)$  和  $w_3(S, T)$ .

MATLAB 环境下 BP 网设计中主要用到的函数: Learnbp 为反向传播学习规则函数, 通过在最速下降方向上不断地调整网络的权值和域值来达到使网络的误差平方和最小, 输出可以得到权值的修正矩阵. Learnbpm 为利用动量规则的改进 BP 学习算法. Logsig(n) 为对数 S 型传递函数, 将神经元的输入范围为  $(-\infty, +\infty)$  映射到  $(0, +1)$ . Purelin(n) 为线性传递函数, 输出输入矢量为  $n$  时的网络层输出矩阵. Simuff( $P, w_1, b_1, f_1$ ) 为前向网络仿真函数. Tansig(n) 为双曲正切 S 型传递函数, 将神经元的输入范围为  $(-\infty, +\infty)$  映

射到(-1, +1). Trainbp 为利用BP算法训练前向网络的函数,  $[w, b, te, tr] = \text{trainbp}(w, b, 'f', p, t, tp)$  为利用单层神经元连接的权值矩阵  $w$ , 域值矢量  $b$  及传递函数  $f$  成批训练网络, 使当输入矢量为  $p$  时, 网络的输出为目标矢量矩阵  $t$ . Trainbpx 为利用快速BP算法训练前向网络的函数.

### 2.3 变速风力发电机神经网络控制设计

#### 2.3.1 功率系数曲线的BP网模型设计

风力发电机从风能获得的机械能由式(1)计算

$$P_r = 1/2\rho S C_p(\lambda, \beta) v^3, \quad (1)$$

其中:  $\rho$  为空气密度;  $S$  为风轮扫掠面积;  $C_p$  为风机的风能利用系数即功率系数;  $v$  为风速.  $C_p$  是叶尖速比  $\lambda$  与桨距角  $\beta$  的函数, 当风速给定时,  $C_p$  值越高, 风能转化为机械能的效率越高. 用BP神经网络来模拟  $C_p$  与叶尖速比  $\lambda$  及桨距角  $\beta$  之间的关系, 设计神经网的输入为: 叶尖速比和桨距角, 因此输入层有2个节点, 输出为: 功率系数, 因此输出层有1个节点, 隐层数及其节点数根据具体要求进行调节. 神经网络训练时, 先对样本与叶尖速比及桨距角进行规格化处理, 以防止网络饱和. 可以采用离线训练, 反向传播学习算法, 使神经网络样本值与期望值误差达到设计允许范围. 在设计时, 样本值的采集非常重要.

#### 2.3.2 最佳桨距角的BP网模型设计

风轮控制器的输入变量为端电压、负载电流、风轮角速度和平均风速, 输出为桨叶桨距角. 由测得的端电压和负载电流估算出风轮功率, 再由采集到的风速估算出风能. 由风轮功率与风能计算出功率系数.

功率系数、叶尖速比及桨距角之间的一组理想曲线如图3所示.

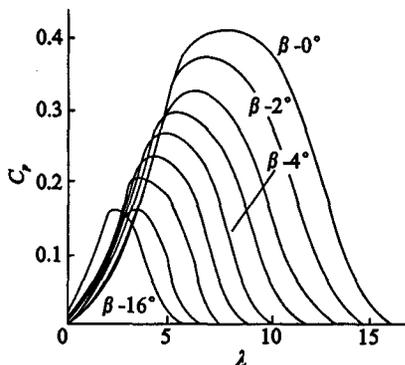


图3 不同桨距角下功率系数随叶尖速比变化曲线

在某一风速下存在一个最佳桨叶桨距角, 并由此产生一个最佳叶尖速比, 该叶尖速比对应最大风能效率的功率系数; 从而在变速风力发电机系统中可以通

过使叶尖速比为最佳叶尖速比来跟踪风速, 获取最大能量. 设计BP神经网络, 采用反向传播学习算法学习最佳曲线. 从而在最大功率系数和最合适的叶尖速比情况下得到最佳桨距角. 设计中, 神经网络离线学习风力发电机组, 建立反向动态模型<sup>[4]</sup>.

## 3 仿真设计

### 3.1 变速风力发电机采用神经网络控制器仿真模型

神经网络控制器采用模型参考控制器, 对风力发电机组进行控制仿真模型如图4所示<sup>[5]</sup>. 其中, beta框为获取最佳桨距角的神经网络控制器; cpopt为获取最大功率系数神经网络控制器.

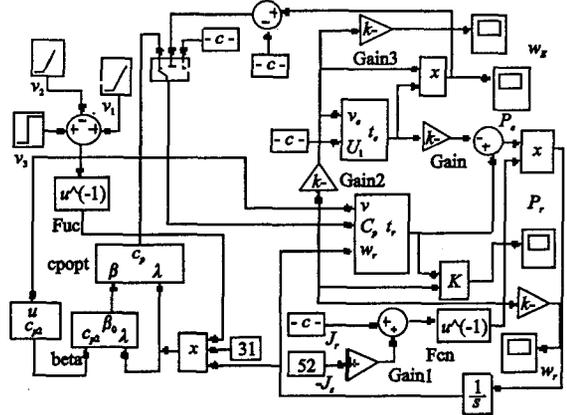


图4 变速风力发电机采用神经网络控制器仿真模型

仿真模型及仿真运算过程在MATLAB环境下Simulink中进行<sup>[6]</sup>.

### 3.2 变速风力发电机采用神经网络控制器的仿真结果

风速为14 m/s时, 采用神经网络控制器变速风力发电机的输出功率和发电机转速响应曲线如图5所示.

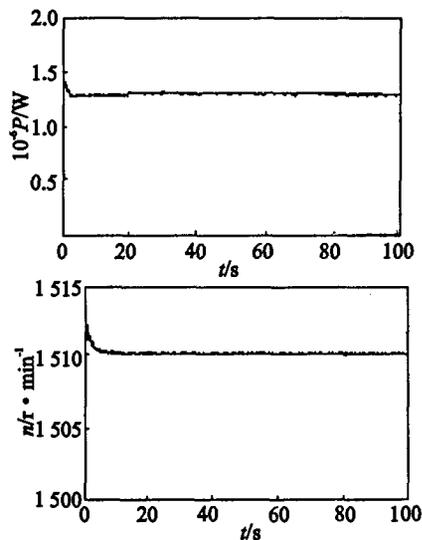


图5 神经网络控制时风机输出功率和发电机转速

## 4 结 论

通过仿真研究表明利用 BP 网对风轮的桨距角寻优,并对风能利用系数即功率系数进行学习,可以达到对变速风力发电机组的有效控制;回避了传统的控制如 PID 控制难以处理的如建立精确数学模型的问题;克服了采用模糊控制需要控制经验的麻烦.从设计仿真结果可以看出,在风速较高的情况下,用神经网络控制器,风力发电机组能够保持功率输出在允许的最大值;当有扰动输入,即风速发生突变时,系统有微小的波动,但是仍然能够保持在最大值附近;与传统的 PID 控制器相比,采用神经网络控制器控制能够有很好的抗风速突然波动的作用,有效地抑制扰动.

## 参考文献:

- [1] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 宫靖远, 贺德馨. 北风电场工程技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 闻新, 周露. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 刘新海, 于淑芳. 神经网络在大型风力发电机电控系统中的应用[J]. 微特电机, 2004, (2): 37-47.
- [5] 李晶, 王伟胜. 变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 14-17.
- [6] 马兴义, 杨立群. MATLAB 6 应用开发指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

# Analysis on the Control of Variable Speed Wind Turbine Using Neural Network Controller

ZHANG Xin-yan<sup>1,2</sup>, WANG Wei-qing<sup>2</sup>, CHENG Jing<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049, China;

2. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China)

**Abstract:** It is very difficult to build the accurate mathematical model of the wind turbine generator system because of the uncertainty of air kinetics and the complexity of power electronics, especially when the wind speed changes abruptly or there is a disturbance. But the classical control needs the model. Using neural network controller to the wind turbine generator system can overcome these difficulties. The wind speed can be followed and the maximum power can be obtained under low wind speed by using the power coefficient curve BP neural network and the optimum pitch angle BP neural network. The maximum power can be kept and under the allowed range in the condition of high wind speed. The simulation model and result are given under the environment of MATLAB. The fluctuation of wind speed can be controlled and the disturbance can be cancelled by BP neural network controller.

**Key words:** variable speed wind turbine generator system; neural network controller; simulation

(编辑 李胜春)