

# 基于反馈数学控制的大型风力机组 变频信号抗扰动方法

廖冬<sup>1</sup>, 常梦星<sup>2</sup>

(1. 南阳师范学院, 河南 南阳 473000; 2. 南阳医学高等专科学校, 河南 南阳 473000)

**摘要:** 当前的风力机组控制模型大都用于处理稳态风力机组, 无法处理大型风力机组的变频信号产生的风力机磁通量的增减的振荡, 容易出现较大的后续扰动和更严重的系统故障, 控制结果存在较大的偏差和滞后性, 为此, 提出了一种基于反馈数学控制的大型风力机组变频信号抗扰动方法, 将反馈数学控制模型引入到大型变频风力机组控制中, 通过分析变频率干扰下风力机组存在的振荡特征, 塑造风力机组静态电压稳定控制数学模型, 采用变系数一阶梯度求解模型的最佳控制解, 保持系统的负载均衡并且处于最佳状态, 实验结果说明该种控制模型能够有效改善变频风力机组的暂态稳定性, 更具有鲁棒性。

**关键词:** 反馈数学控制; 变频风力组; MIMO 模型; 抗扰动

## Large-scale Wind Turbine Variable Frequency Signal Disturbance Resistance Method Based on Feedback Mathematics Control

Liao Dong<sup>1</sup>, Chang Mengxing<sup>2</sup>

(1. Nanyang Normal University, NanYang 473000, China; 2. Nanyang Medical College, NanYang 473000, China)

**Abstract:** Current wind turbine control model are used to handle the steady wind turbine, unable to process variable frequency signal generated large wind turbine wind turbine flux increase or decrease of the oscillation, it's easy to have a larger follow-up disturbance of the system fault and more serious, control result has larger deviation and lag, to that end, this paper proposes a mathematics based on feedback control method of large wind turbine variable frequency signal resistance to disturbance, the feedback control model is introduced into the large wind turbine control, variable frequency interference of wind turbine is analyzed oscillation characteristics, shape the static voltage stability control mathematical model of wind turbine model are deduced with the method of variable coefficient - ladder, optimal control solution to keep the system load balance and in the best state. Experimental results show that this control model can effectively improve frequency transient stability of wind turbine, more robust.

**Keywords:** feedback control of mathematics; variable frequency wind group; MIMO model; resistance to disturbance

### 0 引言

随着我国风力发电在电力系统所占比例的不断增大, 大容量并网风电场和电力系统间的作用逐渐增强。电网出现故障情况下风力机组应能运行一段时间, 并在电网故障解除后, 风力机组仍能够迅速恢复到正常的运行状态, 也就是风力机组在波动频率下应具有较低的电压穿越性能, 进而避免出现较大的后续扰动和更严重的系统故障<sup>[1-2]</sup>。当风力机组出现较大的频率波动时, 寻求合理的控制模型增强并优化风力机组的暂态稳定性成为相关学者分析的重点问题<sup>[3-4]</sup>。当前的风力机组控制模型大都用于处理稳态风力机组, 无法处理大型风力机组的变频信号产生的风力机磁通量的增减的振荡问题, 容易出现较大的后续扰动和更严重的系统故障, 控制结果存在较大的偏差和滞后性, 存在较大的缺陷<sup>[5-6]</sup>。

### 1 问题描述

大型风力机组在实际运行中会存在变频问题, 频率的不断波动将导致风力机组的磁通量出现波动, 使得总体风力机组的

稳定性降低。依据风力机组变频信号可对设备的破坏性和复杂性进行分析, 风机电机通过减速箱按照一定的传动比进行连接, 能够按照最近  $n$  次 ( $n$  是传动比) 风机的频率变化时间间隔传动比运算出电机频率变化间隔, 并按照阈值、滞回值和频率波动值模拟产生风力机组的变频信号。运算公式为:

$$\Delta T = m \times \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots + \Delta T_n}{n} (n = [m]) \quad (1)$$

其中:  $m$  表示传动比,  $n$  表示传动比取整,  $\Delta T$  表示风机的频率波动间隔。不同时间间隔的风力机组的频率波动, 导致风力机组电动机的其转矩同磁通量  $\varphi$  发生变化, 则有:

$$\varphi = K * V / F \Delta T \quad (2)$$

其中:  $V$  表示风力机组的电压,  $F$  表示某时段风力机组的频率,  $\Delta T$  是风机的频率波动间隔,  $K$  是固定值。

通过式 (2) 可得,  $\varphi$  同电压成正比, 同频率  $F$  成反比。风力机在一定的运转频率下, 会产生合理的磁通量。然而变频风力机组的频率是经常变化的, 其变化会导致磁通量出现增减, 造成风力机组过热而出现故障问题。传统风力机组控制模型大都用于处理稳态风力机组, 对变频风力机组效果不好, 因而在不同的频率条件下, 确保风力机组磁通量的稳定性, 要对传统模型进行改进, 以确保电压随着频率一起变化, 采用合理的控制模型将风力机组的电压  $V$  控制在一定的区域中, 确保电压、频率二者能够同时变化, 进而确保频率波动情况下的风力机组

收稿日期:2014-05-17; 修回日期:2014-06-18。

基金项目:2012年河南省信息技术教育研究项目(ITE12099)。

作者简介:廖冬(1973-),男,河南南阳人,硕士,讲师,主要从事计算数学与应用方向的研究。

能够平稳运行。改进后模型如图 1 所示。

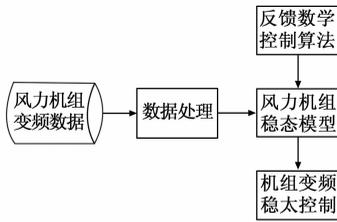


图 1 机组变频稳态控制模型

## 2 反馈数学控制算法的提出

在增强模型稳定性的控制过程中, 常采用反馈数学控制方法, 需要调整变化量在最小状态时符合系统的安全性限制。控制数学模型为:

$$\min F = K_p \left[ \frac{\partial L}{\partial Y} \right]^T \Delta Y + \Delta Y^T K \Delta Y = K_p \sum_{i=1}^{2N+m_1} \frac{\partial L}{\partial Y_i} \Delta Y_i + \sum_{i=1}^{2N+m_1} K_i \Delta Y_i^2 \quad (3)$$

式中,  $K_p$  是系统稳态协调因子,  $\frac{\partial L}{\partial Y}$  是系统对控制变量的灵敏度系数产生的列向量,  $\frac{\partial L}{\partial Y_i}$  是系统对控制变量  $Y_i$  的灵敏度,  $Y$  是控制变量向量,  $\Delta Y$  是控制变量的调控列向量,  $K$  是控制变量  $Y$  的综合元素。

对式 (3) 求解就是在限制规范下的最优化问题的求解, 变系数最陡下降法相融合的方法对该数学模型进行寻优。最陡下降梯度法有:

$$\Delta Y^{i+1} = \Delta Y^i - K g^i \quad (4)$$

其中:  $\Delta Y^{i+1}$ ,  $\Delta Y^i$  分别是控制变量的增量组成的列向量在第  $i$  次, 第  $i+1$  次的值,  $K$  是一个经验标量系数, 其取值通常较低。并且随着寻优次数的增加而增大, 进而避免最陡下降梯度法在接近收敛是收敛速度降低的弊端,  $g^i$  表示目标函数  $F$  的梯度列向量在第  $i$  次的值, 其表达式是:

$$g^i = K_p \frac{\partial L}{\partial Y_i} + 2K_i \Delta Y_i + \sum_{i=1}^m [-\mu_i^i + 2\gamma_i \tilde{h}_i^i(\Delta Y)] \frac{\partial \tilde{h}_i^i(\Delta Y)}{\partial Y_i} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

在相邻的两次寻优中, 若两次寻优的目标函数值差低于预定的误差则停止寻优, 否则调整乘子系数  $\mu_i^i$  后进行下一次迭代。其中  $\mu_i^i$  的调整公式是:

$$\mu_i^{i+1} = \mu_i^i + 2\gamma_i \tilde{h}_i^i(\Delta Y) \quad (6)$$

在寻优过程结束后, 将最后一次的寻优当成最终解。

## 3 算法应用

### 3.1 风力机组变频控制解优化过程

本文在传统模型的基础上, 以变频发电机组的暂态稳定性为目标, 分析变频信号产生的风力机磁通量的增减的振荡问题, 提出了基于反馈数学控制的大规模变频风力机组控制方案, 风力机组变频控制解优化过程如图 2 所示。

大型风力机组的结构配置如图 3 所示, 箭头为功率流动方向。图中功率变换器包括各种不同类型的电力电子装置, 如软并网装置、整流器和逆变器等。在增强变频风力机组静态电压稳定性的控制过程中, 需要调整变化量在最小的状态下符合系

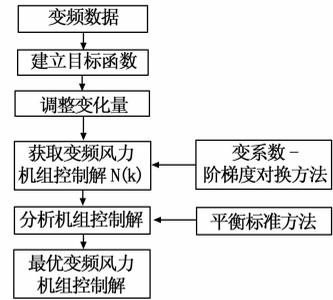


图 2 风力机组变频控制解优化过程

统的安全性限制。不同调控变量的调控区域中, 确保风力机组的静态电压保持稳定, 并且应充分分析系统的经济性。设置风力机组系统节点数量是  $N$ , 可调变压器支路数是  $m_1$ , 控制变量  $Y$  是风力机同变压器变比  $K$  构成列向量,  $Y$  的维数是  $2n + m_1$ , 则能够塑造提高大型变频风力机组系统静态电压稳定性措施的最佳控制数学函数目标。

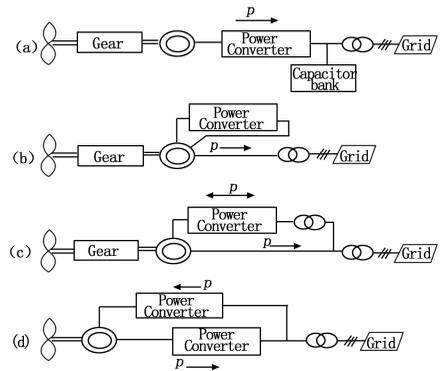


图 3 大型风力机组的典型配置

本文将获取的最佳变频风力机组的控制解当成输入, 以保持系统负载均衡为目标, 对变频风力机组进行分析, 确保风力机组在变频情况下处于最佳状态, 避免风力机组出现故障, 增强系统的运行性能。假设通过变系数一阶梯度对换方法获取的最佳控制解变量是  $N(k)$ , 本文通过  $\sum \omega_i(k) = 1$  将求救问题限制在有限区域中, 提高求解的效率。因而系统的输入  $u_i(k)$  为  $s$ , 该模型分析了系统会受到的干扰  $d_i^p(k)$ , 因而风力机组系统的第  $i$  个结点的输出  $y_i(k)$  通过线性方法变成了  $y_i(k) = \alpha \cdot u_i(k) + b \cdot d_i^p(k)$ , 然而实际检测出的输出中存在误差  $d_i^M(k)$ 。因而输出变成  $\omega_i(k) = y_i(k) + d_i^M(k)$ 。系统中第  $i$  个结点的控制误差等于  $e_i(k) = r(\bar{k}) - \omega_i(k)$ 。该风力机组系统模型是动态的, 其分析了风力机系统的负载变化的动态性, 本文将参照输入定义成:

$$E(W) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i(k) + d_i^M(k)] \quad (7)$$

若不同结点的负载都能达到该值, 则表明风力机组的负载都是相同的, 系统处于负载均衡状态。但是不同结点的负载  $\sigma$  是相对量, 是不同结点负载的任务数相对于本结点所能够操作任务量的相对量。定义成:  $\sigma = \rho/c$ ,  $\sigma$  是结点中当前的任务数,  $C$  是该结点能够操作的任务数。

本文设置了一个平衡标准概念, 用于描述总体系统负载均衡水平的指标, 用  $l(l \geq 0)$  表示风力机组中结点的最大负载同

结点最小负载之差。通过输出方差的概念描述风力机组系统的负载均衡水平，定义为：

$$l = D(W) = \sum E[\omega_i(k) - E(W)]^2 \quad (8)$$

当平衡水平  $l$  符合  $l = 0$  时，也就是  $e_1(k) = \dots = e_i(k) = \dots = e_N(k) = 0$ ，风力机组系统的输出偏离期望最小，也就是该中情况下风力机组系统处于最佳状态，此时得到最佳变频风力机组的控制解。

### 3.2 风力机组静态电压稳定控制过程

根据 3.1 中风力机组稳定控制解优化过程，运用反馈数学控制优化算法，设计并实现的预测模型的框图如图 4 所示。

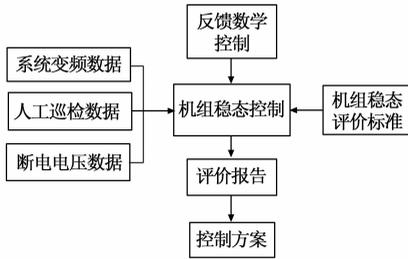


图 4 变频风力机组稳态控制过程

目标函数建立之后，风力机组静态电压稳定控制的优化就转化为求目标函数的最最优解问题。本文采用如下表 1 对大型风力机组性能进行评估，并引入变系数最陡下降法相融合的方法对该数学模型进行寻优。在寻优过程结束后，将最后一轮的寻优当成最终解，最终能够获取变频风力机组控制模型的最佳控制方案，为后续分析提供可靠的依据。

表 1 大型风力机组零件性能评估表

项目	正常	预警	异常	严重
齿轮箱	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>	P <sub>14</sub>
调速装置	P <sub>21</sub>	P <sub>22</sub>	P <sub>23</sub>	P <sub>24</sub>
发电机	P <sub>31</sub>	P <sub>32</sub>	P <sub>33</sub>	P <sub>34</sub>
塔架	P <sub>41</sub>	P <sub>42</sub>	P <sub>43</sub>	P <sub>44</sub>
控制系统及附属部件	P <sub>51</sub>	P <sub>52</sub>	P <sub>53</sub>	P <sub>54</sub>

基于 Matlab 计算与仿真软件的反馈数学控制优化算法风力机组稳态控制分析结果将在下文实验中具体介绍。

## 4 实验分析

为了验证本文提出的基于反馈数学控制的大型风力机组变频信号抗扰动方法的准确性和有效性，在塑造风力机组数学模型的基础上，采用 Matlab/Simulink 构建一台额定功率是 3 MW 的风力发电系统仿真模型。设置额定频率是 12 MHz，在 0~80 s 平均频率是 134 MHz，为了验证频率改变时，所设计控制模型的效果，在第 80 s 开始融入变频，持续时间是 110 s，最大频率是 20 MHz，在 190~210 s 时加入渐变频率，并且持续 40 s，再突变成 17.5 MHz 的平均频率，高于额定频率的频率模拟曲线用图 5 描述。

在传统模型和本文模型两种控制下电机组的磁通量变化曲线用图 6 描述。从曲线中能够得出，频率增大时，两种控制模型都能导致风力机组的磁通量发生变化，但是传统模型控制下的磁通量变化更为敏感，相应的风力机组电压也会出现大幅度的波动，导致风力机组运行出现明显的动荡，而本文控制模型下的风力组磁通量变化幅度较为平稳，能够确保风力机组的稳

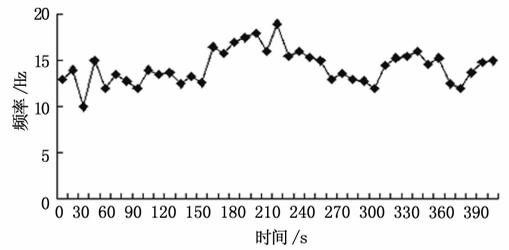


图 5 高于额定频率的频率模拟曲线

定运行。

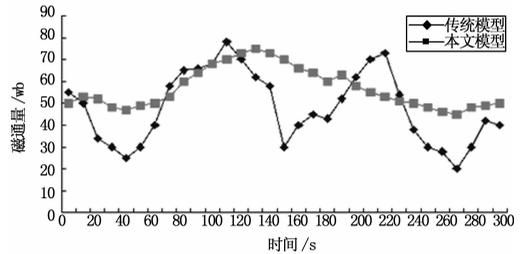


图 6 两种控制模型下风力机组磁通量变化曲线

两种控制模型下风力机组的输出功率曲线用图 7 描述，能够看出两种模型无论频率如何波动，都能通过确保风力机组输出功率的稳定。传统控制模型随着频率波动较大，基于反馈数学控制模型的控制功率随着频率变化较小，具有较强的鲁棒性，证明了本文设计控制模型的正确性和有效性。从曲线数据分析能够看出，本文控制模型优于传统控制模型，具体数据用表 2 描述。

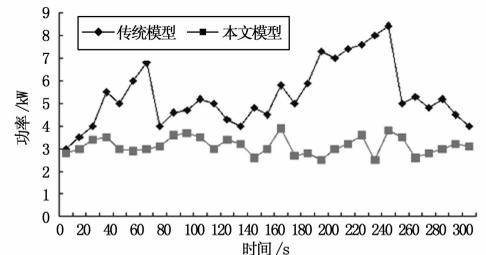


图 7 两种控制模型下风力机组输出功率曲线

表 2 不同控制模型数据对比

控制模型	输出功率平均值/MW	总体控制过程功率最大值/MW	频率时攻略偏差相对值/%
传统模型	2.828	4.6324	-16.87
本文模型	3.1935	3.2545	-3.37

分析表 2 可得，在总体控制仿真时间中，本文控制模型的输出功率平均值同额定值 3 MW 具有较高的匹配性，传统模型下风力机组的功率波动高于本文模型，频率发生突变时，传统模型的功率偏差相对值高于本文控制模型，表明本文模型更优并且更具有实用性。

## 5 结束语

本文提出了一种基于反馈数学控制的大型风力机组变频信号抗扰动方法，通过分析变频干扰下风力机组存在的振荡问题，塑造风力机组静态电压稳定控制数学模型，采用变系数一阶梯度求解模型的最佳控制解，采用 MIMO 模型对以该控制

解为输入值的变频风力机组系统进行综合分析, 保持系统的负载均衡并且处于最佳状态。实验结果说明该种控制模型能够有效改善变频风力机组的暂态稳定性, 传统模型下风力机组的功率波动高于本文模型, 频率发生突变时, 传统模型的功率偏差相对值高于本文控制模型, 表明本文模型更优并且更具有鲁棒性。

**参考文献:**

[1] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (25): 25-31.

[2] 吴学光, 张学成, 印永华, 等. 异步风力发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用 [J]. 电网技术, 1998, 22 (6): 68-72.  
 [3] 李东东, 陈 陈. 风力发电机组动态模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 20 (5), 25 (3): 115-119.  
 [4] 杜伟娟. 条件约束下的概率分布预测理论研究 [J]. 科技通报, 2013, (8): 4-6.  
 [5] 吉同军, 丁晓群, 刘皓明. 双馈式风力发电系统的运行控制与建模仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 41 (3): 81-86.  
 [6] 王利兵, 毛承雄, 陆继明, 等. 基于反馈线性化原理的直驱风力发电机组控制系统设计 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (7): 1-6.



(上接第 2852 页)

方法。由于通过支持向量机方法训练, 得到最优分类面的判别函数仅仅由支持向量构成, 与其它的训练样本无关。由式 (8) 所示的判别函数可以看出, 当采用高斯径向基函数作为核函数时, 支持向量为高斯核的中心。因此, 可以借助支持向量之间的距离, 来确定高斯核函数宽度的选择范围。

高斯核函数宽度确定算法描述:

- 1) 根据两类样本近似的确定, 高斯核宽度  $\sigma_0$ 。

$$\sigma_0 = \frac{1}{m+n} \sum_{i,j=1}^{m,n} \sqrt{\|x_i - x_j\|^2} \quad (10)$$

其中:  $x_i$  目标区域样本,  $x_j$  背景区域样本

- 2) 使用两类样本对高斯核宽度为  $\sigma_0$  的 SVM 训练, 得到支持向量与  $x_j$ , 从而得到支持向量机之间距离,

$$l_i = \sqrt{\|x_i - x_j\|^2} \quad (11)$$

- 3) 依据  $\min(l_i) < \sigma \leq \max(l_i)$  判断, 构成一组高斯核  $\sigma_i$  的判断范围。

最后, 采用交叉验证法确定最终的高斯核函数宽度参数  $\sigma$ 。

**2 试验分析**

结合图像飞机目标自动识别系统, 对本文的识别算法进行了评估, 首先, 对特征提取效果进行了分析。如图 3 (b), (c) 所示, 分别为图像梯度特征提取以及目标边缘特征提取。根据得到的目标边缘, 可以计算出飞机目标的周长, 面积, 凹凸性, 偏心率, 矩形度, 统计矩, 圆形性, 不变矩, 以及梯度 8 方向直方图, 得出结果和人工分割统计结果基本一致。

如图 3 (d) 所示, 飞机目标被很好的识别出来, 且经过试验验证, 使用训练好的 SVM 模型, 无需任何先验知识就可以将飞机目标快速准确的识别出来。经过 100 幅含有飞机图像的飞机目标自动识别验证, 识别概率可以达到 99%。

**3 结论**

本文着重研究了图像中飞机识别的问题, 针对飞机目标的特点, 提一种基于支持向量机的飞机目标自动识别方法, 该方法具有以下特点: 可适应不同尺度和模糊程度的飞机目标; 经试验验证识别速度较快, 且达到自动识别的标准。但是飞机目标种类较多, 各类目标的形状差异复杂, 对飞机类型进行分类

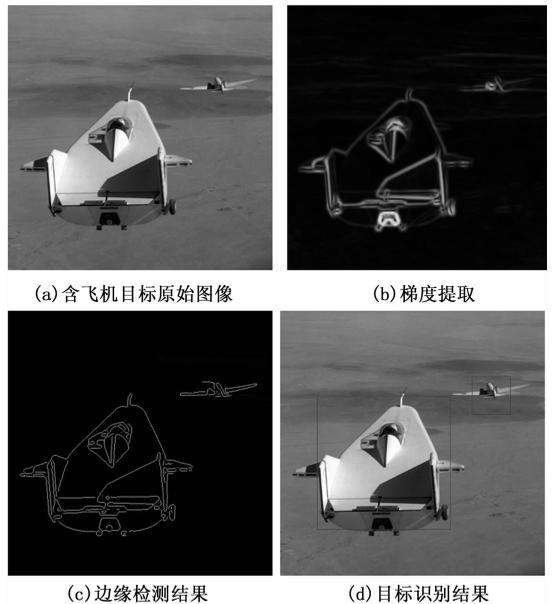


图 3 飞机目标识别示意图

以及形状描述的这方面问题还有待进一步研究。

**参考文献:**

[1] 王卫星, 刘 娟. 基于 Hausdorff 距离的飞机定位方法 [J]. 计算机应用, 2009, (29), 210-214.  
 [2] Bai Z Y, He P K. An impmved Ratio Edge Dgteclor for Target Detection in SAR Images [J]. IEEE Confemnce on Neuml Networks & Signal Processing, 2003, (12): 1523-1531.  
 [3] 许文海, 续元君, 董丽丽, 等. 基于水平集和支持向量机的图像声呐目标识别 [J]. 仪器仪表学报, 2012, (1): 2163-2167.  
 [4] 高恒振, 万建伟, 粘永健, 等. 一种基于谱域-空域组合特征支持向量机的高光谱图像分类算法 [J]. 宇航, 2011, 32 (4): 917-921.  
 [5] Rafael C. Gonzalez Richard, E. Woods. Digital Image Processing Second Edition [M]. (Second Edition). BingJing: Publishing House of Electrons Industry. 2003. 613-615.  
 [6] 杨 耿, 和卫星. 运动目标图像识别与跟踪系统的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2005, (3): 267-269.