

# 大型风电机组独立变桨控制器PI参数联合整定

高 峰, 凌新梅, 王 伟

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

**摘 要:** 目前大型风电机组独立变桨距控制策略主要采用3独立PI控制环结构。针对其PI参数在设计和优化过程中不易整定的问题, 首先应用Bladed软件对风电机组模型进行线性化处理, 获取用于PI参数整定的线性化模型; 然后通过正交实验分析各个PI控制器参数对系统性能指标的影响趋势及影响程度, 并在正交实验的基础上采用免疫遗传算法对独立变桨PI控制器参数进行优化; 最后结合Bladed外控制器、Matlab引擎技术和命名管道技术开发Matlab与Bladed联合仿真平台, 对基于坐标变换的独立变桨控制器进行仿真与验证。仿真结果表明该优化方法对独立变桨控制系统的3个耦合控制器PI参数具有非常好的综合优化效果。

**关键词:** 风电机组; PID控制; 优化; 遗传算法; 参数整定

**中图分类号:** TK81

**文献标识码:** A

## 0 引 言

由风轮扫掠面内风速差异引起气动不平衡载荷, 会给大型风力发电机组造成很大的疲劳载荷和振动。独立变桨距控制可在限制功率的同时改善机组所受气动载荷。目前, 基于坐标变换的独立变桨控制策略因可实现载荷反馈控制而逐渐成为研究热点<sup>[1-8]</sup>, 文献[4~6]采用的二次型优化控制一般需要精确的机组线性化定常模型, 但对于具有强非线性和参数时变的风力发电系统, 机组线性化模型不易建立, 智能控制算法则需要大量的数据运算<sup>[7,8]</sup>, 如在PLC控制器中实现将影响控制的实时性。因此, 国外大型机组独立变桨控制中仍主要采用PI控制算法, 研究其参数优化具有重要的实际意义。

Bladed 仿真软件被广泛应用于机组的设计与优化中, 但进行独立变桨控制仿真时需编制外部控制器(DLL文件, 即动态链接库)。一些先进控制算法采用C++语言开发难度大、周期长。而Matlab中控制工具箱功能强大, 易于实现先进控制算法, 但所建非线性模型准确度低, 仿真功能有限。为了利用Matlab强大的数据分析能力、丰富的控制算法工

具和Bladed中高精度的机组模型, 本文搭建出Bladed与Matlab联合仿真平台。借助该联合仿真平台在正交实验的基础上采用免疫遗传算法对独立变桨控制器参数进行优化, 实现多输入多输出复杂控制系统中多个PI控制器的综合整定与参数优化。

## 1 基于坐标变换的独立变桨距控制

作用于3个桨叶上的非对称风速会在叶根产生非对称弯矩, 即桨叶旋转坐标系(图1a)中的摆振弯矩 $M_{ab}$ 和挥舞弯矩 $M_{yb}$ , 其中桨叶挥舞弯矩 $M_{yb}$ 会在轮毂处产生周期性载荷, 即轮毂固定坐标系(图1b)中的俯仰力矩 $M_{yN}$ 和偏航力矩 $M_{zN}$ 。基于坐标变换的独立变桨控制策略是通过Coleman坐标变换理论将桨叶气动弯矩转换为轮毂俯仰力矩和偏航力矩, 然后将俯仰力矩和偏航力矩作为反馈量来进行载荷控制<sup>[1-3]</sup>。图2为控制原理图, 其中 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 为测得3个叶片在桨叶坐标系下挥舞弯矩 $M_{yb}$ , 通过Coleman坐标变换得到轮毂固定坐标系中的俯仰力矩 $M_{yN}$ 的测量反馈 $M_d$ 和偏航力矩 $M_{zN}$ 的测量反馈 $M_q$ ; 俯仰力矩PI控制器和偏航力矩PI控制器输出桨距角信号 $\beta_d$ 和 $\beta_q$ , 将 $\beta_d$ 和 $\beta_q$ 经过坐标反

收稿日期: 2015-12-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2015MS24)

通信作者: 高峰(1976—), 男, 博士、讲师, 主要从事风力发电机组性能评估与控制优化方面的研究。gaofeng@ncepu.edu.cn

变换得到独立变桨距信号增量 $\Delta\beta_1$ 、 $\Delta\beta_2$ 、 $\Delta\beta_3$ ；最后将功率 PI 控制器输出的同步桨距信号 $\beta$ 和独立桨距信号叠加,就得到 3 个桨叶各自的桨距角控制信号 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 。

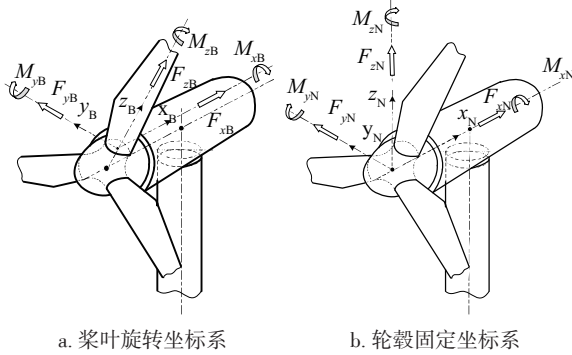


图 1 桨叶旋转坐标系与轮毂固定坐标系

Fig. 1 Blade rotating coordinate system and hub fixed coordinate system

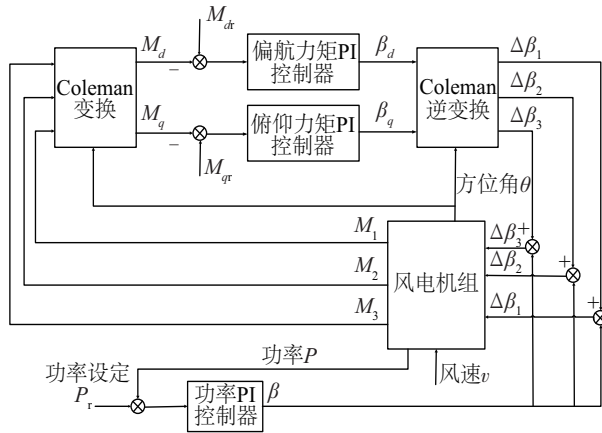


图 2 基于坐标变换的独立变桨控制原理图

Fig. 2 Individual pitch control schematic based on coordinate transformation

该控制策略实质上是对风电机组多变量耦合控制系统进行解耦,将旋转坐标系下的控制状态变换到固定坐标下,实现 3 个控制环的解耦控制,即统一变桨距控制环、风力机轮毂俯仰控制环和风力机偏航控制环。但将多变量耦合问题用坐标变换转换成 3 个独立的反馈控制环,如果在参数整定时未考虑 3 个控制回路的耦合关系,势必造成独立整定参数无法实现整体控制的最优化。因此,笔者在 SISO 系统参数整定的基础上,充分考虑各个控制器回路之间的耦合关系,在 MIMO 系统基础上将 3 个控制环作为一个整体进行 PI 参数优化整定。

## 2 风力发电机组 Bladed 模型线性化

### 2.1 模型线性化计算

基于经典控制理论的 PID 参数整定方法需要对象的数学模型,而目前广泛应用于控制系统仿真的非线性机理模型<sup>[9]</sup>,因其不能计算实时载荷也未考虑风剪、塔影等效应对功率和载荷的影响而无法满足大型风力发电机组独立变桨控制研究的需要。由 GH 公司开发的权威风力发电机组仿真软件 Bladed 可利用大量详细的设备参数建立机组仿真的数学模型,由于该软件通过德国船级社和 IEC 认证,模型准确且仿真精确度高,具有实时载荷计算功能。对由 Bladed 建立的机组模型使用模型线性化(model linearization)功能,再将运算结果进行 Bladed 线性模型后处理,便可得到 MIMO 线性化模型数据文件<sup>[10]</sup>。该文件可在 Matlab 软件中读取并进行形式转换。本文以一台 1.5 MW 异步双馈机组为例完成以上模型线性化工作,并通过后处理计算得到任一风速时用于 PI 参数整定的 SISO 线性模型。例如功率传递函数在风速  $v=16$  m/s 时如式(1)所示,桨叶载荷传递函数则需考虑方位角不同

$$G_{\beta_1}(s) = [3.4835(s+619.4)(s+67.45)(s-9.922) \cdot (s+12.85)(s+5.61)(s^2-0.06232s+8.596) \cdot (s^2+0.09754s+9.176)(s^2+1.124s+99.19) \cdot (s^2+3.728s+312.4)(s^2+0.2838s+545.7) \cdot (s^2+0.3552s+783.3)(s^2-1262s+6713000)] / [(s+3.333)(s+0.1388)(s^2+0.3593s+8.887) \cdot (s^2+0.03835s+8.881)(s^2+3.941s+46.26) \cdot (s^2+2.007s+193.2)(s^2+3.459s+345.3) \cdot (s^2+5.511s+462)(s^2+1.257s+522.6) \cdot (s^2+2.331s+635.8)(s^2+4.964s+4272)] \quad (1)$$

$$G_{\beta_2}(s) = [-2828.9806(s+301.7)(s+0.09197) \cdot (s^2+0.04518s+9.916)(s^2+4.221s+41.1) \cdot (s^2+5.156s+241.7)(s^2+5.096s+437.8) \cdot (s^2-50.68s+2896)(s^2+63.92s+3656)] / [(s+333.3)(s+0.1429)(s+0.00007595) \cdot (s^2+0.3635s+8.885)(s^2+4.197s+41.95) \cdot (s^2+3.938s+46.26)(s^2+3.476s+345.1) \cdot (s^2+5.51s+462)(s^2+4.95s+4273)] \quad (2)$$

模型参数的变化,如风速  $v=16$  m/s,方位角  $\theta=30^\circ$  桨叶挥舞力矩模型如式(2),而方位角  $\theta=60^\circ$  桨叶挥舞力矩模型如式(3)。

$$G_{\beta_3}(s) = [-2785.3577(s+287.4)(s+0.08365)(s-0.0189) \cdot (s^2+0.182s+9.813)(s^2+5.306s+241.5) \cdot (s^2+5.048s+439.2)(s^2+1.729s+519.2) \cdot (s^2-49.35s+2893)(s^2+69.96s+3975)] / [(s+3.333)(s+0.1427)(s-0.001571) \cdot (s^2+0.3587s+8.885)(s^2+3.934s+46.23) \cdot (s^2+3.449s+345)(s^2+5.509s+462) \cdot (s^2+1.255s+522.6)(s^2+4.975s+4273)] \quad (3)$$

## 2.2 线性化模型的降阶处理

虽然通过模型线性化获得了一系列可用于参数整定的 SISO 模型,但由于得到的传递函数阶次过高,不仅不利于分析系统性能,参数整定时系统的离散化计算也极不方便,故需对模型进行降阶处理。笔者采用 Routh 方法<sup>[11]</sup>对模型进行降阶,对于阶次的选择原则是在保证模型准确度的前提下阶次尽量低,这样可使降阶后模型形式简单,利于计算。图 3 是对式(1)模型降阶后阶跃响应的比较,2 阶以上的模型均取得了较好的准确度,所以选择如式(4)的 2 阶模型。

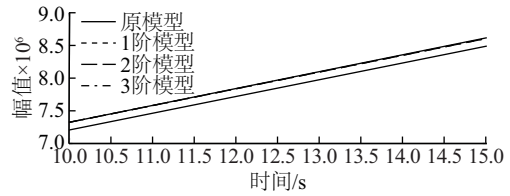
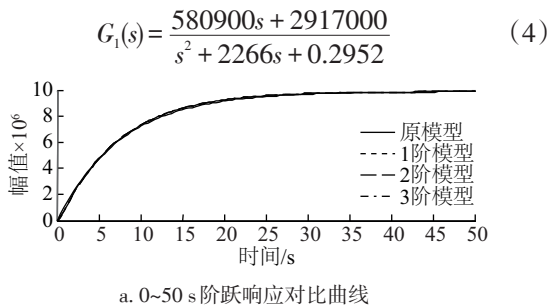


图3 桨距-功率模型阶跃响应比较

Fig. 3 Step response of pitch-power model

## 3 基于正交优选免疫遗传算法的PI参数联合整定与优化

免疫遗传算法 (immune genetic algorithm, IGA) 与普通遗传算法相比具有免疫记忆功能,可加快搜索速度,提高总体搜索能力,避免陷入局部解<sup>[12]</sup>,但直接将其运用到独立变桨控制器参数的整定与优化中存在以下问题:首先,独立变桨的 3 个控制器参数的寻优范围难以确认,其次,性能指标的选取应考虑 3 个控制器之间的关系,协调时如何进行指标间的权重分配。为了解决上述问题,笔者采用正交实验来确定性能指标之间的权重关系和确定控制器参数寻优范围与初值,再基于免疫遗传算法进行整体寻优,实现对独立变桨控制系统 PI 控制器的综合整定与优化。

### 3.1 正交实验法 PI 参数整定

独立变桨控制系统中 3 个 PI 控制器参数共有 6 个,分别为  $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$ 、 $K_{p2}$ 、 $K_{i2}$ 、 $K_{p3}$ 、 $K_{i3}$ 。因此正交实验选取的因素数为 6,理论取值为  $[K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{p3}, K_{i3}] = [0.02, 0.01, 25, 0.30, 30.00, 2.50]$ ,每个因素均选 5 个水平,因素 A~F 依次代表  $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$ 、 $K_{p2}$ 、 $K_{i2}$ 、 $K_{p3}$ 、 $K_{i3}$ 。如表 1 所示,由理论取值确定水平 1~5 对应的

表1 5水平6因素正交实验表( $L_{25}(5^6)$ )

Table1 Orthogonal table of  $L_{25}(5^6)$

实验次数	A	B	C	D	E	F	$P_{ITAE}$	$M_{dITAE}$	$M_{qITAE}$
1	1	1	1	1	1	1	0.5007	0.1041	0.1019
2	2	1	2	2	2	2	0.5211	0.0970	0.1083
3	3	1	3	3	3	3	0.5653	0.1063	0.0959
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	5	2	1	5	4	3	0.2571	0.1292	0.1182
23	5	3	2	1	5	4	0.2839	0.1084	0.1166
24	5	4	3	2	1	5	0.3170	0.1427	0.1358
25	5	5	5	3	2	1	0.3547	0.1433	0.1668

控制器参数数值范围分别为  $K_{p1} \in [0.01 \sim 0.03]$ ,  $K_{i1} \in [0.006 \sim 0.014]$ ,  $K_{p2} \in [15 \sim 35]$ ,  $K_{i2} \in [0.18 \sim 0.42]$ ,  $K_{p3} \in [20 \sim 40]$ ,  $K_{i3} \in [1.5 \sim 3.5]$ , 根据正交表的设计规则采取  $L_{25}(5)^6$  设计。

首先选取风电机组功率的绝对误差乘以时间的积分 ( $P_{ITAE}$ ), 作为性能指标来衡量功率控制性能; 选取  $M_d$  的绝对误差乘以时间的积分 ( $M_{dITAE}$ ), 作为性能指标来衡量  $d$  轴上载荷控制性能; 选取  $M_q$  的绝对误差乘以时间的积分 ( $M_{qITAE}$ ), 作为性能指标来衡量  $q$  轴上载荷控制性能。为了使风电机组的功率和载荷的综合控制效果达到最优, 选取综合性能指标为式(5)。

$$J_{ITAE} = r_1 \cdot P_{ITAE} + r_2 \cdot M_{dITAE} + r_3 \cdot M_{qITAE} \quad (5)$$

式中,  $r_i$  ——  $P_{ITAE}$ 、 $M_{dITAE}$ 、 $M_{qITAE}$  之间权重系数<sup>[13]</sup>,

采用式(6)计算:

$$r_i = Y_i / (Y_1 + Y_2 + Y_3), \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中,  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$  —— 正交试验时各因素不同水平所对应的  $P_{ITAE}$ 、 $M_{dITAE}$ 、 $M_{qITAE}$  值之和。

经计算  $r_1=0.6534$ ,  $r_2=0.1735$ ,  $r_3=0.1731$ 。可看出  $P_{ITAE}$  对综合性能指标影响最大,  $M_{dITAE}$ 、 $M_{qITAE}$  对综合性能指标影响基本相同, 与俯仰力矩和偏航力矩两者完全独立在理论上相吻合<sup>[14]</sup>。

对表 1 中的实验结果进行统计分析, 计算得到  $J_{ITAE}$  指标下  $T_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$  值, 如表 2 所示。  $T_i$  表示任一列上相同水平号所对应的实验指标和, 由  $T_i$  的大小可判断因素的优水平。各种因素优水平的确定与实验指标有关, 本实验中性能指标应越小越好, 所以应挑选每个因素的  $T_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$  值中最小值对应的那个水平。

表 2 各因素不同水平所对应的  $J_{ITAE}$  指标和

Table 2 The  $J_{ITAE}$  index sum of the different levels and factors

因素	$K_{p1}$	$K_{i1}$	$K_{p2}$	$K_{i2}$	$K_{p3}$	$K_{i3}$
$T_1$	1.8996	1.1653	1.4942	1.3717	1.3966	1.3570
$T_2$	1.5824	1.3075	1.3746	1.3971	1.3744	1.3927
$T_3$	1.3348	1.3577	1.3469	1.3662	1.4191	1.4904
$T_4$	1.1354	1.5156	1.3818	1.4257	1.4514	1.4128
$T_5$	1.1027	1.7088	1.4574	1.4942	1.4134	1.4020

极差分析的方法简称 R 法, R 称为极差, 是任一列因素各水平的试验指标和的最大值与最小值之差。极差越大说明该因素水平变化时对实验指标的影响越大, 可以根据极差的大小判断实验因素对实验指标影响的主次顺序。通过分析表 2 可得  $J_{ITAE}$  指标最小时实验因素的主次顺序为 A、B、C、F、D、E, 最优方案为  $A_5$ 、 $B_1$ 、 $C_3$ 、 $D_3$ 、 $E_2$ 、 $F_1$ 。极差分析结果如表 3。

表 3  $J_{ITAE}$  指标下实验结果极差分析表

Table 3 Range analysis of experimental results under the  $J_{ITAE}$  index

实验因素	A	B	C	D	E	F
极差值	0.7969	0.1473	0.5435	0.1280	0.0770	0.1334
优水平	5	1	3	3	2	1

采用同样的分析方法分别得出在  $P_{ITAE}$ 、 $M_{dITAE}$ 、 $M_{qITAE}$  指标下的最优方案, 见表 4~表 6。在  $P_{ITAE}$  指标下主次顺序为 A、B、C、D、F、E, 最优方案为  $A_5$ 、 $B_1$ 、 $C_3$ 、 $D_1$ 、 $E_3$ 、 $F_2$ ; 在  $M_{dITAE}$  指标下主次顺序为 A、E、B、F、D、C, 最优方案为  $A_3$ 、 $B_1$ 、 $C_2$ 、 $D_1$ 、 $E_5$ 、 $F_2$ ; 在  $M_{qITAE}$  指标下主次顺序为 A、E、D、B、C、F, 最优方案为  $A_2$ 、 $B_4$ 、 $C_3$ 、 $D_1$ 、 $E_4$ 、 $F_2$ 。

表 4  $P_{ITAE}$  指标下实验结果极差分析表

Table 4 Range analysis of experimental results under the  $P_{ITAE}$  index

实验因素	A	B	C	D	E	F
极差值	1.4921	0.1596	0.097	0.8832	0.0877	0.0898
优水平	5	1	3	1	3	2

表 5  $M_{dITAE}$  指标下实验结果极差分析表

Table 5 Range analysis of experimental results under the  $M_{dITAE}$  index

实验因素	A	B	C	D	E	F
极差值	0.1154	0.0292	0.0839	0.0684	0.0512	0.063
优水平	3	1	2	1	5	2

表 6  $M_{qITAE}$  指标下实验结果极差分析表

Table 6 Range analysis of experimental results under the  $M_{qITAE}$  index

实验因素	A	B	C	D	E	F
极差值	0.1991	0.1064	0.1164	0.056	0.1484	0.0231
优水平	2	4	3	1	4	2



综上所述,不同指标下的优选方案不同,不同因素对指标的影响也不同,因素A对上述4个性能指标都影响最大,因素A、B、C对指标 $J_{ITAE}$ 、 $P_{ITAE}$ 的影响重要性一致,因素A、E对 $M_{dITAE}$ 、 $M_{qITAE}$ 指标影响的主次顺序一致。根据综合性能指标 $J_{ITAE}$ 选取的最优方案对应的控制器参数为 $[K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{p3}, K_{i3}] = [0.03, 0.06, 25, 0.3, 30, 1.5]$ 。

### 3.2 基于免疫遗传算法的PI参数综合优化

把由正交试验得到的控制器参数作为免疫遗传算法寻优的初值: $[K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{p3}, K_{i3}] = [0.03, 0.06, 25, 0.3, 30, 1.5]$ ,搜索范围确定为 $K_{p1} \in [0.02, 3], K_{i1} \in [0.001, 0.1], K_{p2} \in [10, 50], K_{i2} \in [0.2, 1], K_{p3} \in [10, 50], K_{i3} \in [1, 5]$ 。免疫遗传算法中使用的样本个数为30,取交叉概率 $P_c=0.9$ ,变异概率 $P_m=0.1$ ,浓度阈值 $a=0.9$ 。适应度函数为 $F=1/J_{ITAE}$ 。笔者以风速12 m/s时的模型为对象,采用实数编码方式,经过100代进化,获得的优化参数为 $[K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{p3}, K_{i3}] = [0.068, 0.015, 48.34, 0.31, 44.72, 2.96]$ 。与理论值和正交优选初值的转速控制阶跃响应比较及性能指标计算结果如图4,对于功率稳定性要求很高的风电机组控制来说经免疫遗传算法优化的控制器参数取得了最佳的控制效果。

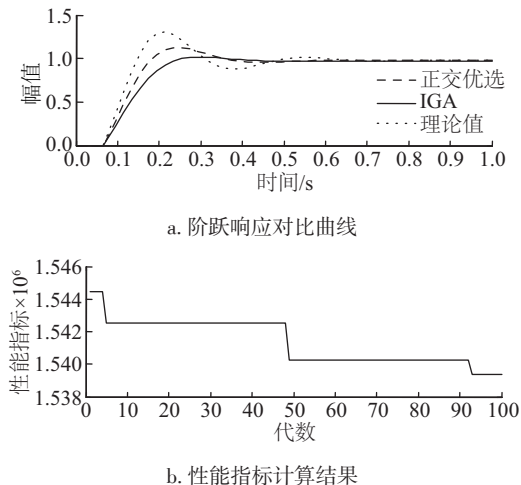


图4 阶跃响应对比曲线和性能指标进化过程

Fig. 4 Step response correlation curve and evolution of performance index

## 4 联合仿真平台搭建与仿真实例

### 4.1 联合仿真平台关键技术与设计方案

要实现 Bladed 与 Matlab 联合仿真,需要把 Bladed 中机组运行的实时数据送到 Matlab 中进行运算处理,然后再将 Matlab 中运算结果实时的传递回 Bladed 来控制执行机构。Bladed 软件与 Matlab 并无直接的接口,但通过 Bladed 外部控制器可获取机组运行的实时数据。Matlab 提供的接口方式有 Matlab 引擎、ActiveX 等,Matlab 引擎接口程序支持 C/C++ 等语言,通过这个接口可调用 Matlab 所有功能,也可实现与 Matlab 的数据交换。这样,通过 C++ 中的命名管道技术把外部控制器 DLL 中获得的 Bladed 实时数据传递到联合仿真平台中,然后把通过 Matlab 引擎将 Matlab 运算结果也传递到联合仿真平台中,最后在联合仿真平台中进行数据交换,从而达到联合仿真的目的。

“命名管道”又名“命名管线”(named pipes),是一种简单的进程间通信机制,创建管道的进程称为管道服务器,连接到一个管道的进程为管道客户机。一个进程在向管道写入数据后,另一进程就可从管道的另一端将其读取出来<sup>[15]</sup>。命名管道可在同一台计算机的不同进程之间或在跨越一个网络的不同计算机的不同进程之间,支持可靠的、单向或双向的数据通信。联合仿真平台数据交换流程如图5所示。

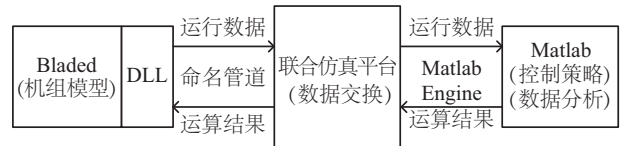


图5 数据交换流程图

Fig. 5 The flow chart of data exchange

### 4.2 联合仿真平台运行流程

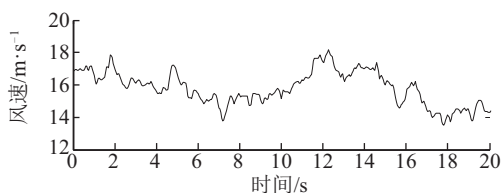
由于 Matlab 引擎技术已非常成熟,要实现联合仿真的核心问题是 Bladed 外控制器和联合仿真平台之间的通信,命名管道技术把外控制器 DLL 文件作为管道服务器,联合仿真平台作为管道客户机,

服务器与客户机都能进行管道的读写操作,可实现数据的双向传递。因此,联合仿真平台的运行分为以下几个流程:

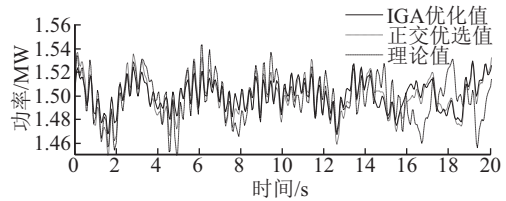
- 1) 首先利用指针打开 Matlab 引擎;
- 2) 运行 Bladed 软件,选中所需计算项,加载 DLL 文件,其中 DLL 文件中有创建命名管道的指令,点击 Bladed 软件界面的“runnow”按钮,此时 Bladed 软件并不立刻进行仿真,而是先创建了一个向联合仿真平台发送运行数据的写管道,并等待客户端读管道的创建;
- 3) 在客户端也就是联合仿真平台中创建读管道,等管道完全打开就可进行数据的双向读写操作,即将 Bladed 运行数据经联合仿真平台发往 Matlab,并从 Matlab 读取运算结果发往 Bladed 软件中;
- 4) 仿真结束后关闭 Matlab 引擎,销毁管道,进行数据分析处理。

### 4.3 联合仿真结果

为验证本文提出参数优化方法的优越性,以仿真实例机组为对象,在 Matlab 中编写基于坐标变换的独立变桨控制程序,PI 参数分别采用理论值、正交优选初值和遗传算法优化数值进行联合仿真。仿真湍流风速样本与功率对比曲线如图 6,载荷对比曲线如图 7。对于功率控制的效果,正交优选值和 IGA 优化值均略好于理论值,但三者差别不大均可实现控制要求。而对于载荷控制,3 组 PI 参数的控制效果差别较大,正交优选值好于理论值,经 IGA 优化的 PI 参数则明显优于前两者,这充分说明所采用的先经理论值确定搜索范围,再由正交试验计算寻优初值的免疫遗传优化算法的优越性。



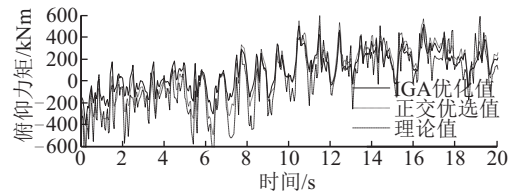
a. 湍流风速样本



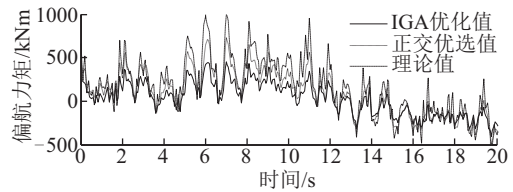
b. 功率对比曲线

图6 湍流风速与功率对比曲线

Fig. 6 Turbulent wind speed and power correlation curve



a. 俯仰力矩对比曲线



b. 偏航力矩对比曲线

图7 俯仰与偏航力矩对比曲线

Fig. 7  $M_{yN}$  and  $M_{zN}$  correlation curve

## 5 结 论

1) 经 Bladed 模型线性化、后处理计算与模型降阶处理,可获取用于独立变桨控制 PI 参数整定的风电机组线性化模型。

2) 通过正交实验分析基于坐标变换独立变桨控制中 3 个 PI 控制器参数对系统性能指标的影响趋势及影响程度,从而计算寻优初值并合理选取适应度函数,防止优化时陷入局部最优解。

3) 在正交实验分析结果的基础上应用免疫遗传算法对独立变桨 PI 控制器参数进行优化,仿真结果表明该优化方法对独立变桨控制系统的 3 个耦合控制器 PI 参数具有非常好的综合优化效果。

受篇幅所限,笔者并未讨论风速大范围变化时普通 PI 控制器的鲁棒性,统一变桨距控制中已普遍采用变增益 PI 控制代替普通 PI 控制器来解决 PI 参数无法自适应调整的问题,这一方法也适用于本文的独立变桨距控制,只需在多个风速点分别进行模型线性化和 PI 参数优化,再根据 PI 参

数随桨距角的变化规律实现变增益独立变桨距控制。

### [参考文献]

- [1] Jelavic M, Petrovic V, Peric N. Individual pitch control of wind turbine based on loads estimation [A]. 34th Annual Conference of IEEE [C], Orlando, America, 2008.
- [2] Geyler M. Individual blade pitch control design for load reduction on large wind turbines [A]. Proceedings of the European Wind Energy Conference [C], Milano, Italy, 2007.
- [3] 应 有, 许国东, 潘东浩, 等. 大型风电机组独立变桨控制技术研究 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(6): 891—896.
- [3] Ying You, Xu Guodong, Pan Donghao, et al. Study on the independent variable pitch control technology for large wind turbine [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2011, 32(6): 891—896.
- [4] Endusa B. Augmented LQG controller for enhancement of online dynamic performance for WTG system [J]. Renewable Energy, 2008, 33(8): 1942—1952.
- [5] Nouridine S, Camblong H, Vechiu I, et al. Comparison of wind turbine LQG controllers using individual pitch control to alleviate fatigue loads [A]. 18th Mediterranean Conference on Control & Automation [C], Marrakech, Morocco, 2010.
- [6] 邢作霞, 陈 雷, 孙宏利, 等. 独立变桨距控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(26): 131—138.
- [6] Xing Zuoxia, Chen Lei, Sun Hongli, et al. Strategies study of individual variable pitch control [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(26): 131—138.
- [7] 鲁效平, 顾海港, 林勇刚, 等. 基于独立变桨距技术的风力发电机组载荷控制研究 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(11): 1591—1598.
- [7] Lu Xiaoping, Gu Haigang, Lin Yonggang, et al. Study on load control of wind turbine based on independent variable pitch technology [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2011, 32(11): 1591—1598.
- [8] 唐春林, 郑 宇. 基于神经元PID的风力发电机组独立变桨控制 [J]. 人民长江, 2012, 43(5): 93—97.
- [8] Tang Chunlin, Zheng Yu. Independent variable pitch control of wind turbine generator based on neuron PID [J]. Yangtze River, 2012, 43(5): 93—97.
- [9] 郭 鹏. 模糊前馈与模糊PID结合的风力发电机组变桨距控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(8): 123—128.
- [9] Guo Peng. Variable pitch control of wind turbine generator combined with fuzzy feed forward and fuzzy PID controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(8): 123—128.
- [10] 叶杭冶. 风力发电机组监测与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013, 148—162.
- [10] Ye Hangye. Wind generator's monitoring and control [M]. Beijing: China Machine Press, 2013, 148—162.
- [11] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计(第2版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006, 118—165.
- [11] Xue Dingyu. Computer aided control systems design using MATLAB language (2nd Ed.) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006, 118—165.
- [12] 黄友锐, 曲立国. PID控制器参数整定与实现 [M]. 北京: 科学出版社, 2010, 36—52.
- [12] Huang Yourui, Qu Ligu. Parameter tuning and implementation of PID controller [M]. Beijing: Science Press, 2010, 36—52.
- [13] 王 岩, 隋思涟. 实验设计与MATLAB数据分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010, 153—186.
- [13] Wang Yan, Sui Silian. Experimental design and MATLAB data analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010, 153—186.
- [14] 姚兴佳, 李 缘, 郭庆鼎. 基于坐标变换的独立桨距调节技术 [J]. 可再生能源, 2010, 28(5): 19—22.
- [14] Yao Xingjia, Li Yuan, Guo Qingding. Individual pitch regulation based on coordinate transformation [J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(5): 19—22.
- [15] 刘兴华, 敬 维, 林 威. GH Bladed 和 Matlab 的交互软件设计及风力发电机的独立变桨控制器仿真研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 83—88.
- [15] Liu Xinghua, Jing Wei, Lin Wei. Interactive software platform design based on GH Bladed and Matlab with simulation study of individual pitch controller of wind turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 83—88.

## PI PARAMETERS JOINT TUNING FOR INDIVIDUAL PITCH CONTROLLER OF LARGE WIND TURBINE

Gao Feng, Ling Xinmei, Wang Wei

*(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)*

**Abstract:** At present, the control strategy of the individual pitch system mainly adopts three independent PI control structures. Aiming at the problem that its PI parameters are not easy to set during design and optimization, Bladed software was firstly used to linearize wind turbine model to obtain the linear model for PI parameter tuning; then through the orthogonal experiment, the influence trend of each PI controller parameter on system performance index and its influence degree were analyzed and PI parameters of individual pitch controller was optimized by immune genetic algorithm; finally, combining Bladed external controller, Matlab Engine technology and named pipe technology to develop Bladed and Matlab co-simulation platform, and simulate and validate the individual pitch controller based on coordinate transformation. The simulation results showed that the optimization method has a very good comprehensive optimization effect on the PI parameters of the three coupling controllers in the individual pitch control system.

**Keywords:** wind turbines; PID control; optimization; genetic algorithm; parameters tuning