

6-4-2020

Parameters Optimization for Variable Speed and Pitch Controller of Wind Turbine Based on Bladed

Gao Feng

School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

Wang Wei

School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

Xinmei Ling

School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Parameters Optimization for Variable Speed and Pitch Controller of Wind Turbine Based on Bladed

Abstract

Abstract: Due to nonlinearity and time-varying parameters of wind power system, its controller parameters are hard to be calculated and tuned during the process of design and optimization. The linear model which is suitable for parameters tuning was built through model linearization of Bladed and model reducing-order algorithm. *The PI parameter was tuned with the IM-PSO (Immune Memory Particle Swarm Optimization).* Moreover, the gain coefficient of optimal torque control and the gain divisor of adaptive PI pitch control conducted optimizing calculation based on the identification parameters of Bladed. *A set of optimization method for variable speed and pitch controller of wind turbine was established.* The simulation results show the validity and advantages of the proposed methods.

Keywords

wind turbine, Bladed, controller, optimization, immune memory particle swarm optimization

Recommended Citation

Gao Feng, Wang Wei, Ling Xinmei. Parameters Optimization for Variable Speed and Pitch Controller of Wind Turbine Based on Bladed[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1644-1651.

基于 Bladed 风电机组变速与变桨距控制器参数优化

高峰, 王伟, 凌新梅

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要: 由于风力发电系统具有非线性和参数时变等特点, 其控制器参数在设计和优化时不易计算与整定。利用 Bladed 软件中模型线性化结合模型降阶算法建立了适用于参数整定的机组线性化模型, 应用免疫记忆粒子群算法整定控制器 PI(Proportion Integral) 参数, 并基于 Bladed 参数辨识结果计算了最优转速-转矩控制的增益系数和自适应 PI 变桨距控制的增益因子, 形成了一种基于 Bladed 的风电机组变速与变桨距控制器参数优化方法。仿真结果表明了该优化方法的正确性和有效性。

关键词: 风电机组; Bladed; 控制器; 优化; 免疫记忆粒子群算法

中图分类号: TM614

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 07-1644-08

Parameters Optimization for Variable Speed and Pitch Controller of Wind Turbine Based on Bladed

Gao Feng, Wang Wei, Ling Xinmei

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

Abstract: Due to nonlinearity and time-varying parameters of wind power system, its controller parameters are hard to be calculated and tuned during the process of design and optimization. The linear model which is suitable for parameters tuning was built through model linearization of Bladed and model reducing-order algorithm. The PI parameter was tuned with the IM-PSO (Immune Memory Particle Swarm Optimization). Moreover, the gain coefficient of optimal torque control and the gain divisor of adaptive PI pitch control conducted optimizing calculation based on the identification parameters of Bladed. A set of optimization method for variable speed and pitch controller of wind turbine was established. The simulation results show the validity and advantages of the proposed methods.

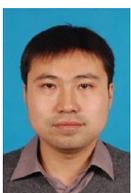
Keywords: wind turbine; Bladed; controller; optimization; immune memory particle swarm optimization

引言

目前实际风力发电机组控制中仍主要采用 PI 控制和查表控制等传统控制算法^[1], 但是对于具有强非线性和参数时变的风力发电系统, 机组线性化定常模型不易建立, 控制器参数的整定与优化计算往往需要花费大量时间; 风速的大范围随机变化又

使控制参数对运行工况的适应性较差, 研究适用于风力发电机组控制器的参数优化方法具有十分重要的现实意义。

文献[2]采用粒子群算法优化双馈风力发电机有功与无功 PI 控制器参数; 文献[3]则研究了直驱永磁风力发电机的 PI 参数整定; 文献[4]提出了基于正交优选粒子群算法优化定子有功功率控制器的参数; 文献[5-6]研究了双馈风力发电机组转子侧变频器的 PI 控制; 文献[7]则应用粒子群算法在双馈发电机转子侧的变频器控制。以上研究主要针对发电机变频器的机侧与网侧 PI 控制器, 并没有涉



收稿日期: 2015-03-10 修回日期: 2015-11-12;
基金项目: 中央高校基本科研业务费(2015MS24);
作者简介: 高峰(1976-), 男, 山东, 博士, 讲师, 研究方向为风电机组建模与控制; 王伟(1988-), 男, 河南, 硕士, 研究方向为风电机组控制优化; 凌新梅(1991-), 女, 河北, 硕士, 研究方向为风电机组控制优化。

<http://www.china-simulation.com>

• 1644 •

及机组变速与变桨距控制器中的 PI 参数整定。文献[8]运用的小信号分析法在双馈风力发电机组确定的运行点进行线性化,在此基础上通过零极点配置设计控制器,但当系统运行点改变时,参数优化后的控制器控制效果可能会变差,需要对控制参数进行重新优化,而且并没有讨论已实际应用 in 机组中的自适应 PI 控制的参数优化方法。

风力发电机组设计与仿真软件 Bladed 目前被广泛应用于机组的设计及改型中。笔者借助该软件高精度的机组模型和准确的参数辨识功能,基于免疫记忆粒子群算法进行 PI 控制器参数整定和最优转矩控制增益系数的优化计算,最后利用得到的各风速工况点 PI 参数实现自适应 PI 变桨距控制,形成了一种基于 Bladed 的风电机组变速与变桨距控制器关键参数整定与优化方法。

1 基于 Bladed 的变桨距 PI 控制参数整定与优化

由于自然风的大范围随机变化,大型风力发电机组控制器的作用随着机组运行状况的不同分为桨距控制和转矩控制。在额定风速以下进行转矩控制,通过调节转矩控制转速,而桨距角保持最佳桨距角不变,实现最大风能追踪;反之则进行桨距控制,通过改变桨距角来控制转速,而转矩设定保持额定不变,实现恒功率控制。根据图 1 中的机组转速-转矩曲线^[9],转矩控制主要包含最优转矩控制(BG 段),也包括恒转速控制(AB 段和 GH 段)。

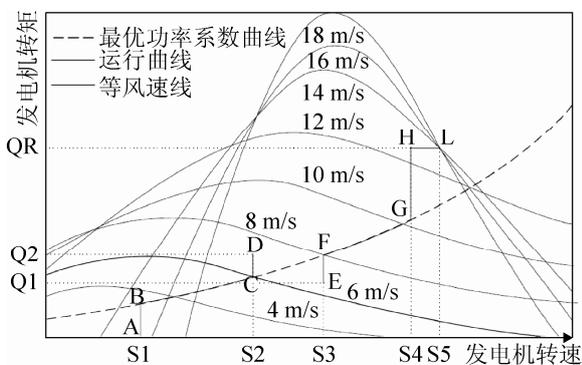


图 1 风力发电机组转速-转矩曲线

在 BG 段主要采用查表控制或最优增益系数法进行最大风能捕获控制,PI 控制算法则应用在 AB 段和 GH 段的恒转速控制中,因此本文 PI 参数整定除研究变桨距 PI 控制外,还将研究恒转速转矩 PI 控制,而最优转矩控制的参数优化计算将在第 3 节中讨论。

1.1 基于 Bladed 的风电机组模型线性化

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,由于大型风力发电机组是一个连续的非线性多变量随机系统,无法直接建立用于参数整定的线性模型,而目前广泛应用于控制系统仿真的非线性机理模型^[10],因其中理想化的理论假设和近似处理太多使得模型准确性不够。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数学机组仿真模型,由于该软件通过德国船级社和 IEC 认证,仿真计算准确,模型精确度高,已成为公认的行业标准之一。对由 Bladed 建立的机组模型使用模型线性化 (Model Linearization) 功能,可得到形如式(1)的 MIMO 线性化模型数据文件^[11]。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (1)$$

系数矩阵 A, B, C, D 为三维数组,最后一维是风速。将该文件运用 Bladed Linear Model 和 Matlab 软件进行后处理计算,即可得到风速范围内任一风速下用于 PI 参数整定的 SISO 线性模型。本文以一台 1.5 MW 异步双馈机组为例完成了以上建模工作,其中桨距-转速模型在风速 $v=16$ m/s 的传递函数如式(2)所示。

算例机组主要参数如下:

风轮额定转速: 20 r/min; 发电机额定转速: 1 800 r/min; 最小发电机转速: 1 200 r/min; 发电机额定转矩: 8 460 Nm; 额定风速: 12 m/s; 切入风速: 3.5 m/s; 切出风速: 25 m/s; 轮毂高度: 84 m; 风轮半径: 35 m; 齿轮箱传动比: 90。

$$G_{\beta}(s) = (0.00098671(s + 538.4)(s + 17.03)(s - 14.77) \cdot (s^2 - 0.03263s + 8.591)(s^2 + 0.112s + 9.152) \cdot (s^2 + 1.506s + 120.3)(s^2 + 3.508s + 251.3) \cdot (s^2 + 9.724s + 378.4)(s^2 + 0.313s + 543.3) \cdot (s^2 + 0.4601s + 729.8)(s^2 - 580.4s + 1599000)) / ((s + 3.333)(s + 0.2497)(s^2 + 0.3597s + 8.85) \cdot (s^2 + 0.04259s + 8.882)(s^2 + 3.889s + 47.03) \cdot (s^2 + 1.936s + 191.2)(s^2 + 3.461s + 336.7) \cdot (s^2 + 5.722s + 469.6)(s^2 + 1.076s + 524.9) \cdot (s^2 + 2.312s + 640.7)(s^2 + 4.799s + 4105)) \quad (2)$$

1.2 线性化模型的降阶处理

虽然通过线性化计算可以取得一系列的 SISO 传递函数,但是显而易见的是这些传递函数阶次过高,这不仅不利于时域系统的计算,也不利于分析系统性能和参数整定,故需要对模型进行降阶处理。因大多数工业过程对象可用一阶惯性时延环节(FOLPD)描述,对(2)式中的桨距-转速模型分别采用 3 种拟合方法降阶后得到 FOLPD 模型。分别为

$$\text{最小二乘法: } G_1(s) = \frac{-593.4}{4.012s+1} e^{-0.406s} \quad (3)$$

$$\text{频域响应法: } G_2(s) = \frac{-593.4}{4.605s+1} e^{-0.313s} \quad (4)$$

$$\text{传递函数法: } G_3(s) = \frac{-593.7}{4.026s+1} e^{-0.403s} \quad (5)$$

其阶跃响应对比曲线如图 2,可以看出频域响应法效果较差,而传递函数法在稳态误差上要大于最小二乘法。最小二乘模型降阶法的原理是寻求与原传递函数误差平方和最小的低阶函数来代替原函数,因此相对依据理论计算的其它 2 种方法收到了更好的拟合效果。

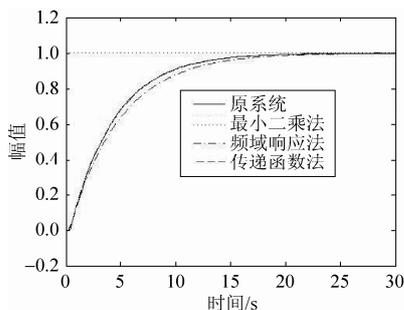


图 2 桨距-转速模型阶跃响应比较

1.3 应用免疫记忆粒子群算法的 PI 参数整定与优化

免疫记忆粒子群算法(Immune Memory Particle Swarm Optimization, IM-PSO)与普通的粒子群算法相比具有免疫记忆功能,可以加快搜索速度,提高总体搜索能力。为避免陷入局部最优解,优化计算初值选取十分关键。笔者根据降阶后的线性模型采用最优参数整定法^[12]进行初步整定,将整定结果用于免疫记忆粒子群算法中的计算初值,这样可有有效的解决局部最优问题。

对式(5)中的桨距-转速 FOLPD 模型,利用最优参数整定法中的 ISE、ISTE、IST²E 指标进行整定,其整定结果如表 1。其中 K_p 为 PI 控制器比例系数, T_i 为 PI 控制器积分时间。图 3 为 3 种目标函数所得控制系统的阶跃响应曲线对比。可见 ISE 得到了更好的动态特性,而 IST²E 得到了更好的稳态特性,为兼顾系统动态性能和稳定特性选择 ISTE 做为最优参数法的整定指标。

表 1 桨距控制 PI 参数整定结果

整定方法	K_p 值	T_i 值	超调量	调节时间
ISE	0.012 7	5.949 7	22%	3.05 s
ISTE	0.009 9	4.254 5	9%	2.02 s
IST ² E	0.008 5	3.992 5	4%	1.75s

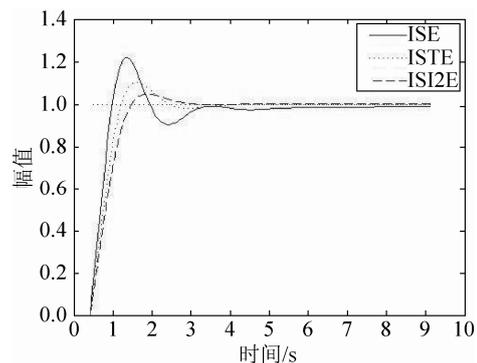


图 3 不同指标整定 PI 参数控制效果对比

笔者以最优参数法整定的 PI 参数作为免疫记忆粒子群算法初值,并以该结果为中心向左右两边扩展,形成了一个范围缩小了的种群搜索空间,以保障搜索的快速性和防止陷入局部最优。

免疫记忆粒子是通过计算当前粒子群体中粒子的适应度值及位置得到, 并把粒子的位置作为免疫记忆粒子存入记忆库中, 并判断是否满足结束条件, 再将记忆库中免疫记忆粒子替换粒子群中适应度较差的粒子从而更新粒子群。粒子群体的更新过程, 总是适应度高的粒子被保留下来, 适应度低的粒子被替换。适应度函数评估是选择操作的主要依据, 指导着优化算法按控制目标的要求不断优化。因此, 笔者采用性能指标函数形式为:

$$J = \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_4 |ey(t)|) dt + w_3 t_u \quad (6)$$

式中: $e(t)$ 为系统误差; $u(t)$ 为控制器输出; t_u 为上升时间; $ey(t)$ 超调量; w_1, w_2, w_3, w_4 为权值, 且 $w_4 \gg w_1$ 。该性能指标函数充分考虑了控制的准确性、快速性、稳定性, 而且为避免超调, 采用了惩罚功能, 即一旦产生超调, 将超调量作为最优指标的一项, 并给控制器各性能指标函数赋予不同的权重。

1.4 系统内部稳定性判定

由于风速扰动信号的随机性, 风电机组控制系统可以视为典型反馈控制系统结构的扩展, 如图 4。

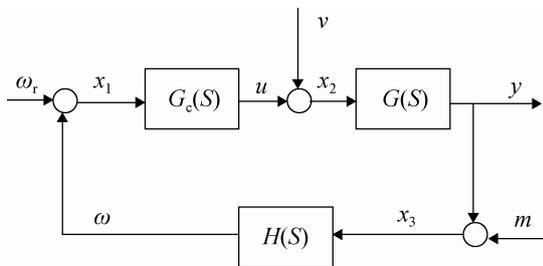


图 4 带有风速扰动的反馈控制系统

在这个系统结构下, 扰动信号 v 为外部风速扰动信号, m 为转速测量噪声, ω_r 为转速设定, 仅分析系统的输入和输出稳定性只能保证由稳定输入激励下的输出信号有界性。只有系统从输入信号 (ω_r, v, n) 到内部输出信号 (x_1, x_2, x_3) 的 9 个闭环传递函数都稳定, 系统才是内部稳定的。系统传递函数可以表示成:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + G(s)G_c(s)H(s)} \begin{bmatrix} 1 & -G(s)H(s) & -H(s) \\ G_c(s) & 1 & -G_c(s)H(s) \\ G(s)G_c(s) & G(s) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ v \\ m \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据内部稳定性定理, 闭环系统内部稳定的充要条件^[13]:

- (1) 传递函数 $1 + H(s)G(s)G_c(s)$ 没有 $Re[s] \geq 0$ 的零点;
- (2) 乘积 $H(s)G(s)G_c(s)$ 中没有 $Re[s] \geq 0$ 的零极点对消。

第 1 个条件等效于闭环系统的稳定性, 所以只需判定第 2 个条件。对经参数整定和优化的 PI 控制系统均进行内部稳定性判定, 可保证系统的稳定性。

2 恒转速转矩 PI 控制器参数整定与计算

以上桨距控制器 PI 参数整定方法同样可以应用在转矩 PI 控制的参数整定中。算例机组转矩-转速模型在风速 $v=8$ m/s 的传递函数如式(8)所示。

$$\begin{aligned} G_Q(s) = & (-20.8155(s^2 + 0.07258s + 47.86) \cdot \\ & (s^2 + 22.63s + 309.7)(s^2 + 5.33s + 1582)) / \\ & ((s + 25)(s + 40.51)(s + 0.06) \cdot \\ & (s^2 + 31.58s + 506.2)(s^2 + 2.358s + 273) \cdot \\ & (s^2 + 3.535s + 1699)) \end{aligned} \quad (8)$$

由于转矩控制主要为电气设备控制, 对象的纯延迟非常小, 但惯性相对较大, 可直接采用模型降阶法得到一阶惯性模型。对(8)式中转矩-转速模型分别采用 Pade 和最优降阶法^[13]降阶为一阶惯性环节。

$$\text{Pade 降阶法: } G_4(s) = \frac{-0.002045}{s + 0.05977} \quad (9)$$

$$\text{最优降阶法: } G_5(s) = \frac{-0.002045}{s + 0.05977} \quad (10)$$

其阶跃响应对比曲线如图 5, 2 种方法均起到了非常好的降阶作用。

本文以降阶转矩模型为对象, 采用免疫记忆粒

子群算法进行了PI参数优化,计算中使用的群体个数数目为30,取学习因子 $c_1=c_2=2$,惯性因子 $w_{\max}=0.9$ 、 $w_{\min}=0.4$,交叉概率 $P_c=0.9$,变异概率 $P_m=0.1$ 。模型降阶后通过最优参数整定法所得初值为: $K_p=4\ 580.505$, $T_i=5.849$ 。免疫记忆粒子群算法 K_p 的取值范围为[4 000, 5 000], T_i 的取值范围为[1, 10]。取 $w_1=0.999$, $w_2=0.001$, $w_3=2.0$, $w_4=100$ 。采用实数编码方式,经过100代的进化,获得的优化参数为 $K_p=3\ 701.5$, $T_i=7.458$ 。性能指标仿真结果如图6,通过与最优参数整定法的阶跃响应比较可以看出免疫记忆粒子群算法整定的控制器取得了更好的控制效果。

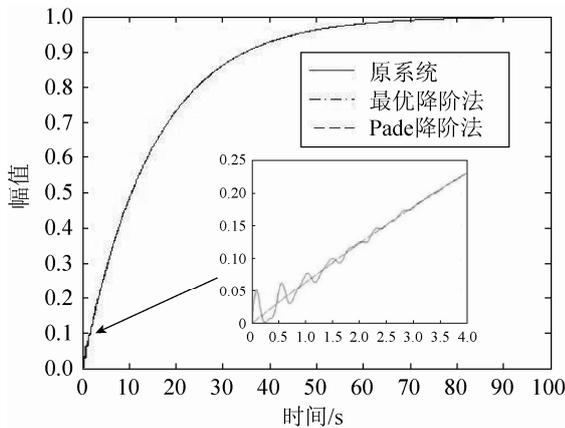


图5 转矩-转速模型阶跃响应比较

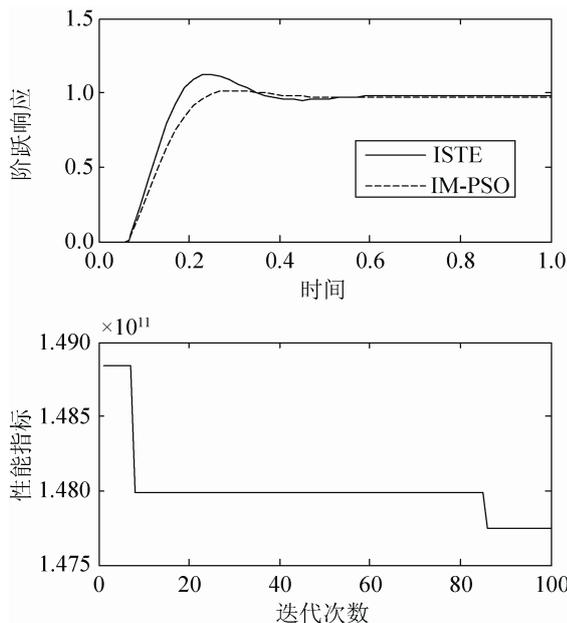


图6 阶跃响应与性能指标

低于额定风速下的恒转速控制虽然包含两部分控制,但一般由一个PI控制器完成,在测量转速越过临界值 $(S1+S4)/2$ 时速度设置点可在最小转速 $S1$ 与最大转速 $S4$ 之间进行切换。在整定时可先根据高、低风速时的模型分别整定再进行综合。由本文提出的建模方法得到机组风速 $v=5\text{ m/s}$ 和 11 m/s 的转矩-转速模型 G_6 和 G_7 ,分别用于 $S1$ 和 $S4$ 转速控制的参数整定:

$$G_6(s) = \frac{-0.002\ 047}{s + 0.052\ 54} \quad (11)$$

$$G_7(s) = \frac{-0.002\ 044}{s + 0.067\ 79} \quad (12)$$

由于对象特性变化不大,因此参数整定的结果也比较接近,只需对经过优化整定的两部分PI参数取均值就可获得两部分恒转速控制均较好的控制效果。

3 最优转速-转矩控制器参数辨识与计算

最优转矩控制中的主要采用查表法或最优增益法计算最优转矩,最优增益法相对查表法连续性更好,可提高发电量,目前越来越多的机组采用最优增益法。对于最优比例系数 K_{opt} 的计算,即:

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \pi \rho R^5 C_{p\max} \frac{1}{G^3 \lambda_{opt}^3} \quad (13)$$

需要最大风能利用系数和最佳叶尖速比这两个关键特性参数,其辨识的准确性对控制器的控制效果有着重要影响。式(13)中, ρ 为空气密度; R 为风轮半径; $C_{p\max}$ 为最大风能利用系数; G 为齿轮箱传动比; λ_{opt} 为最佳叶尖速比。低于额定风速进行转矩控制时,桨距角被设置为最优桨距角度,由于风机叶片的气动特性不同, 0° 并非一定为最优值,其是否最优也直接影响机组的最大风能利用系数。图8是利用Bladed软件得到的不同桨距角下叶尖速比-风能利用系数曲线。最佳桨距角选择原则有3点:第1, $C_{p\max}$ 要高;第2, $C_p-\lambda$ 曲线的顶端要平;第3, λ 要尽可能的小,因为风力发电机组的叶尖噪声和叶尖速比 λ 的五次方成正比。经过

比较, 桨距角在 2° 时, $C_p-\lambda$ 曲线顶端既保持了平缓的趋势, 又能使 C_{pmax} 尽可能的高。因此最佳桨距角约为 2° 。根据桨距角为 2° 曲线可得, 算例机组的 C_{pmax} 为 0.46, λ 为 7。所有参数代入(13)式计算, 可算得最佳增益 K_{opt} 为 0.125。图 8 为 K_{opt} 分别取 0.1, 0.125, 0.15 低风速时功率对比仿真结果, K_{opt} 取 0.125 时发电机功率最大。

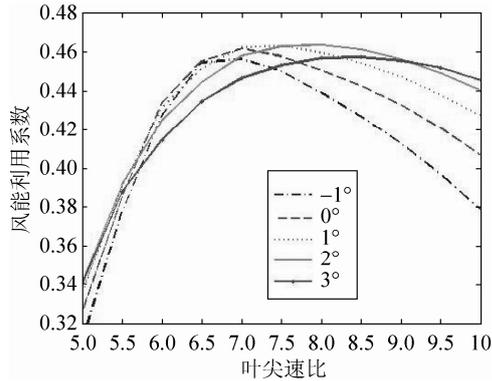


图 7 风能利用系数曲线簇

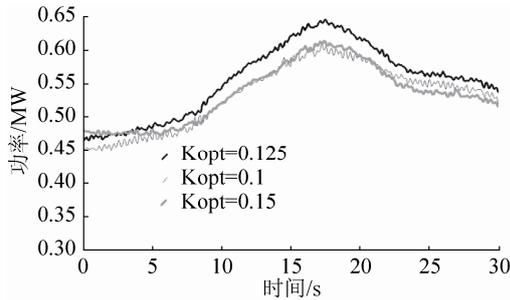


图 8 发电机功率比较

4 自适应 PI 桨距控制器参数整定

应用本文提出的建模方法, 可得到实例机组在风速高于额定时各风速点的桨距-转速 FOLPD 模型, 因篇幅所限这里仅给出风速分别为 12 m/s, 14m/s, 18m/s, 20 m/s 的桨距-转速模型如下:

$$G_8(s) = \frac{-862.4}{9.362s+1} e^{-0.448s} \quad (14)$$

$$G_9(s) = \frac{-702.4}{5.74s+1} e^{-0.419s} \quad (15)$$

$$G_{10}(s) = \frac{-517.6}{2.962s+1} e^{-0.389s} \quad (16)$$

$$G_{11}(s) = \frac{-469.3}{2.336s+1} e^{-0.377s} \quad (17)$$

可见, 由于风力发电系统具有参数时变的特点, 在各个风速点桨距-转速模型参数变化较大, 所以基于某个风速点模型整定的 PI 参数无法在整个工作范围都取得最优控制效果。因此根据风速点的变化自动调整 PI 参数的自适应桨距控制器会取得更好的控制效果。对于如何进行 PI 参数调整, 许多学者主张采用智能实时整定方法^[14-16], 目前在 PLC 中还不易实现。笔者根据不同风速点的模型分别整定出最优参数, 再根据多组 PI 参数与桨距角之间变化规律, 自适应调整桨距控制器 PI 参数。Bladed 仿真中采用变增益因子的自适应 PI 控制器, 其形式为:

$$G_c(s) = \frac{K_p}{F(\beta)} \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (18)$$

式中, $F(\beta)$ 为增益因子, 为桨距角的非线性函数。由于各个工作点的桨距角稳态值可由 Bladed 辨识计算, 自适应桨距控制 PI 参数如表 2 所示。

表 2 自适应桨距控制 PI 参数整定结果

$\beta_i(\text{deg})$	1.2261	7.8495	11.8029	15.0516	17.9393
K_p	0.0136	0.0113	0.0099	0.0089	0.0081
T_i	9.7910	6.0423	4.2545	3.1660	2.5169
$F(\beta)$	1	1.2	1.4	1.5	1.7

为验证自适应增益因子计算结果, 在 Bladed 桨距控制器中设置表 2 中第一组 PI 参数为基准参数, 不同桨距角变化范围的增益因子 F 如表 2。对自适应 PI 控制和普通 PI 控制在湍流风下(如图 9)进行仿真比较, 结果如图 10~12 所示。

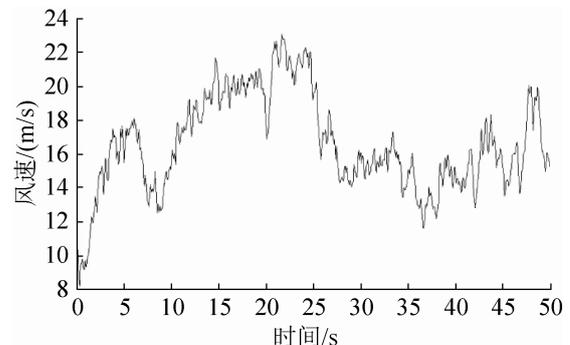


图 9 湍流风速样本

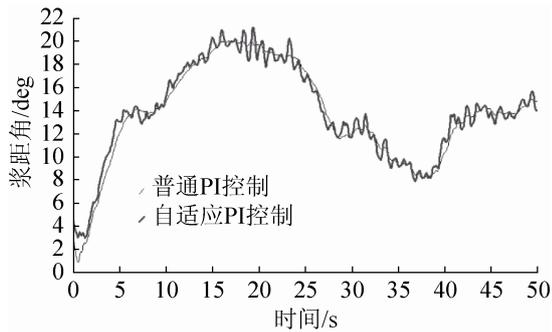


图 10 桨距角变化过程

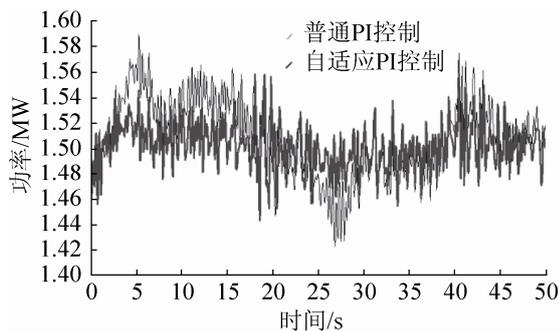


图 11 输出功率比较

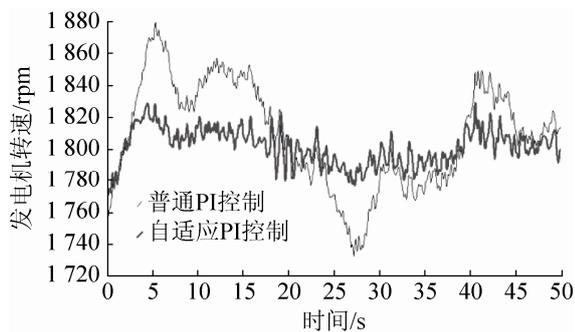


图 12 发电机转速比较

综合以上结果, 自适应 PI 控制其功率和转速波动更小, 取得了优于普通 PI 控制的控制效果。

5 结论

针对风力发电机组控制器参数在设计和优化过程中不易计算与整定的问题, 借助 Bladed 软件的模型线性化和参数辨识功能对机组控制器参数进行了辨识计算和整定, 形成了一种基于 Bladed 软件的风力发电机组控制器参数优化方法。通过对所形成参数辨识与优化方法的仿真与验证, 可得出以下结论:

1) 利用 Bladed 的模型线性化获得适用于 PI 参数整定的机组线性模型, 基于该模型通过免疫记忆粒子群优化算法整定得到转矩与桨距控制的 PI 参数, 实现控制器 PI 参数的最优整定。

2) 根据由机组设备参数建立的 Bladed 仿真模型进行最大风能利用系数、最佳叶尖速比和最优桨距角等相关参数的辨识, 运用这些特性参数可准确的计算转矩控制器中最优增益系数;

3) 基于不同风速点模型分别整定出多组 PI 参数, 再根据其变化规律, 计算 PI 参数自适应调整的增益因子, 可实现自适应变桨距控制, Bladed 运行仿真结果表明了自适应 PI 控制的优越性, 同时也证明了所提出变增益 PI 控制参数整定方法的正确性。

参考文献:

- [1] G L Garrad Hassan. Bladed User Manual (Version 4.2) [M]. England: Garrad Hassan & Partners Ltd., 2011.
- [2] Y Bekakra, D B Attous. Optimal tuning of PI controller using PSO optimization for indirect power control for DFIG based wind turbine with MPPT [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management (S0975-6809), 2014, 5(3): 219-229.
- [3] A Ali, A Moussa, K Abdelatif, et al. Comparative performance of wind turbine driven PMSG with PI-controllers tuned using heuristic optimization algorithms [C]// IEEE International Energy Conference. Croatia: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014: 120-126.
- [4] 吴峰, 汪海洋, 金宇清. 基于正交优选粒子群算法的双馈风电系统控制器参数优化整定 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 19-24.
- [5] Jordi Zaragoza, Josep Pou, Antoni Arias, et al. Study and experimental verification of control tuning strategies in a variable speed wind energy conversion system [J]. Renewable Energy (S0960-1481), 2010, 36(10): 1421-1430.
- [6] Bourdoulis K M, Alexandridis T A. Rotor-side cascaded PI controller design and gain tuning for DFIG wind turbines [C]// 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Turkey: Institute of Electrical and Electronics Engineers. USA: IEEE, 2013: 733-738.

(下转第 1660 页)