

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.07.012

风电机组控制系统稳定性分析

陶 芬, 杨 微

(中船重工(重庆)海装风电设备有限公司, 重庆 400030)

摘要:风电机组系统的稳定性直接关系到整机性能、安全及寿命,是机组设计中必须考虑的内容之一。通过 GH Bladed 软件的模态线性化方法对风电机组进行分段线性化处理,在 Matlab/Simulink 中搭建风电机组控制算法的非线性仿真模型,然后分别采用阶跃响应、根轨迹、伯德图、Nyquist 曲线对比分析开环控制和闭环控制系统的稳定性、闭环控制系统在无扰动和有扰动情况下的稳定性情况,并对某 2 MW 机组的控制系统进行稳定性分析,分析结果表明,系统是稳定的。对风电机组控制系统进行稳定性分析为风电机组设计如机组的安全性、可靠性、鲁棒性等问题提供一定的理论依据。

关键词:风力发电机组;控制算法;稳定性分析

中图分类号:TP273; TK81 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2018)07-093-14

Stability analysis of a wind turbine control system

TAO Fen, YANG Wei

(CSIC(Chongqing) HaiZhuang Windpower Equipment Co.,Ltd., Chongqing 400030, P.R.China)

Abstract: The stability of wind turbine is directly related to its overall performance, safety and lifetime, so it must be considered in the plant design. In our experiment, segmented linearization of the wind turbine is conducted by modulus linearization of GH Bladed software, on the basis of which a nonlinear simulation model of wind turbine control system is established in MATLAB/SIMULINK enviroment . Step response, root locus, Bode diagram and Nyquist curve are used in stability analysis of the open-loop controlsystem and closed-loop control system in disturbed and undisturbed enviroments. All analytical results show that the 2 MW control system is stable. It's necessary to analyze the stability for the control system of wind turbine, which can provide a theoretical basis for the design of wind turbine ralating to such issues as security, reliability and robustness.

Keywords: wind turbines; control algorithm; stability

任何系统都必须稳定工作,而且满足规定的稳态和动态特性要求,同时对于干扰应具有一定的抑制能力和鲁棒性。风电机组的稳定性在运行时发挥着重要的作用,其运行参数的动态响应过程与动态载荷直接相关,对机组结构件的疲劳强度也会造成影响,控制系统只有稳定,才能谈得上控制性能的好坏。

收稿日期:2017-12-13

基金项目:科技部国际合作资助项目(2010DFB60700)。

Supported by Program of International S & T Cooperation Projects of Science and Technology of China (2010DFB60700).

作者简介:陶芬(1987—),女,工程师,硕士研究生,主要从事控制策略研究,(Tel)18627005229;(E-mail)jennie219@foxmail.com。

郑刚^[1]建立了风电机组的动态模型,通过李雅普诺夫分析方法,给出了机组稳定性的判断条件,通过仿真平台对风电机组在不同工况,不同运行阶段的仿真验证了系统的动态稳定性。Chen Wang(2009)^[2]用 2 质量块模型建立了风电机组的动态模型,研究了低于额定风速下变速风电机组采用转矩控制的运行稳定性。Dushyant Palejiya(2013)^[3]风电机组采用多输入单输出和单输入单输出 2 种控制模式,提出一种监督切换控制算法,采用 Lyapunov 函数对开环和闭环系统控制算法进行稳定性分析,验证系统的稳定性。John Licari(2013)^[4]建立风电机组的系统 Simulink 仿真模型,提出一种扭振减振器,采用频域分析法对系统进行稳定性分析,同时进行了半实物实时仿真实验。Andrew Buckspan(2013)^[5]建立一种非线性单输入单输出系统,采用降额运行发电机转矩控制方式,分析了系统在低于额定风速下的稳定性,但对高于额定风速下的稳定性未作具体分析。

综上所述,关于控制算法稳定性方面的研究,在对风电机组进行建模时,大多采用传统的建模方式,比如基于 Matlab 的风电机组建模,少有联合 GH Bladed 的气弹模型及 Matlab 的控制模型,进而对风电机组控制系统进行稳定性分析,为实现风电系统的动态稳定控制,需对控制算法稳定性进行深入探讨。在对系统进行稳定性分析前,在 Matlab 中建立基于 bladed 的系统分段线性化模型,然后,根据阶跃响应、伯德图、奈奎斯特曲线等,分别对系统在低于额定风速和高于额定风速情况下,进行仿真分析并给出结果,判断系统的稳定性,研究随机取某厂家 2MW-H111 叶片模型为对象。

1 建立风电机组分段线性化模型

采用的风电机组模型结构如图 1 所示

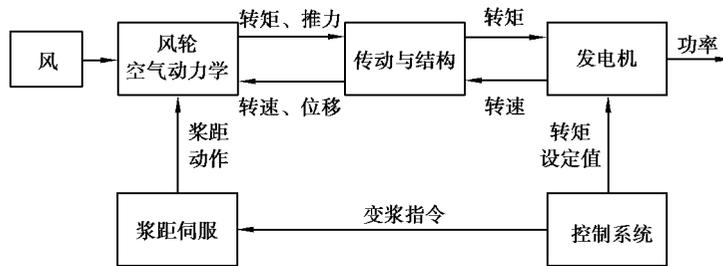


图 1 风电机组模型结构

Fig.1 Model structure for wind turbine

风力发电机组动态特性由构成机组各部件的动态特性相互耦合构成,它包括风能特性、风轮空气动力学、传动链系统动力学、结构动力学、发电机以及执行器的动态特性。各部分动态特性都比较复杂,要分别建立其动态特性数学模型,再将其组合起来形成整机动态模型变得困难。GH bladed 软件中的模态线性化模块能有效建立各类风力发电机组动态数学模型。

模态线性化需定义的模块包括风能特性对应参数‘Physical Constants’、风轮空气动力学对应参数‘Rotor configuration, Blade geometry, Aerofoil data’、传动链系统动力学对应参数‘Drive train’、发电机对应参数‘Generator’以及空气动力学控制参数、仿真控制参数和控制系统参数,结构动力学对应参数需要在软件模态分析模块中单独设置^[6]。

同时,在 bladed 的 Model linearisation 中进行线性化设置,然后计算。对模态线性化的计算结果进行后处理,会自动生成文件 linmod1.mat,在 Matlab 中读取处理该文件,可得到低于额定风速和高于额定风速下的风机数学模型。

以某厂家 2MW-H111 叶片模型为例,在 bladed 中计算出该叶片从切入风速到切出风速下机组的数学模型,可在 Matlab 中搭建模型并对系统进行仿真(如图 2 所示)。如该叶片额定风速为 9.8 m/s,其风速段取为低于额定风速段 3~9 m/s、高于额定风速段 10~23 m/s,风速间隔取 1 m/s,分别通过 bladed 计算各个风速下机组对应的线性化模型,然后

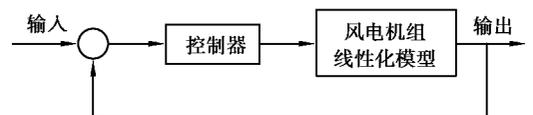


图 2 控制仿真模型图

Fig.2 Simulation flow chart of control module

在 Matlab 中对各不同风速对应的线性化模型进行分析。

通过计算线性系统的状态空间矩阵,利用阶跃响应、根轨迹、伯德图等对系统进行稳定性分析。

2 控制算法的稳定性分析

系统在低于额定风速时,主要采用转矩控制,通过对转速的控制跟踪最佳 C_p 曲线以获得最大能量;高于额定风速时,主要采用变桨控制,以保持发电机恒定的功率输出,并使发电机转速随功率输入快速变化,保证发电机在允许转速范围内持续工作。因此,需要在低于额定风速和高于额定风速的情况下分别对系统进行稳定性分析。

主要以已有模型为对象,分析控制器的动态特性对系统稳定性的影响,包括对比分析开环系统和闭环 PI 控制系统的稳定性,并对比分析调整 PI 参数前后,PI 参数对系统稳定性的影响程度;同时分析在对闭环控制系统分别加入不同程度外界干扰的情况下,系统的稳定性情况。

2.1 低于额定风速下系统稳定性分析

2.1.1 开环系统

在 bladed 中计算出系统期望转矩和测量转速的开环传递函数后,即可在 Simulink 中搭建转矩控制开环模型并对其进行仿真。

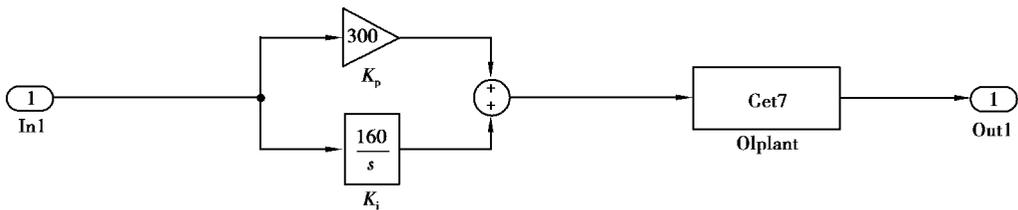


图 3 转矩控制开环模型

Fig.3 Open loop model of torque control

如上图所示,给定输入 In1 为期望发电机转速,经过 PI 控制模块运算后,得到期望转矩,再经过风速为 7 m/s 时的系统开环传递函数,得到系统输出为测量转速。分别利用阶跃响应、根轨迹、伯德图、奈奎斯特曲线判据^[7-8]的仿真结果如下所示

1) 单位阶跃响应曲线

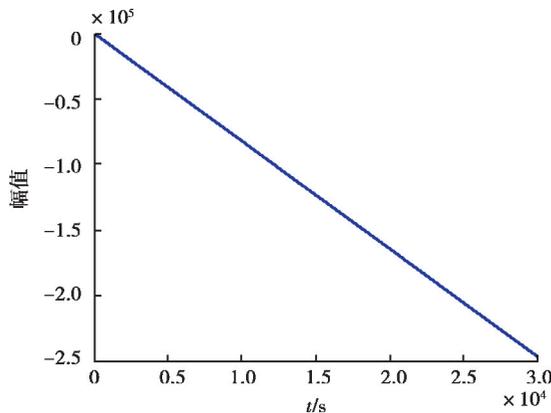


图 4 开环系统单位阶跃响应曲线

Fig.4 Unit step response curve of open loop system

由图中单位阶跃响应曲线可以看出,开环控制系统发散,需对系统进行校正。

2) 根轨迹

由图 5 可知,系统存在一个具有正实部的极点,由根轨迹判据开环系统不稳定。

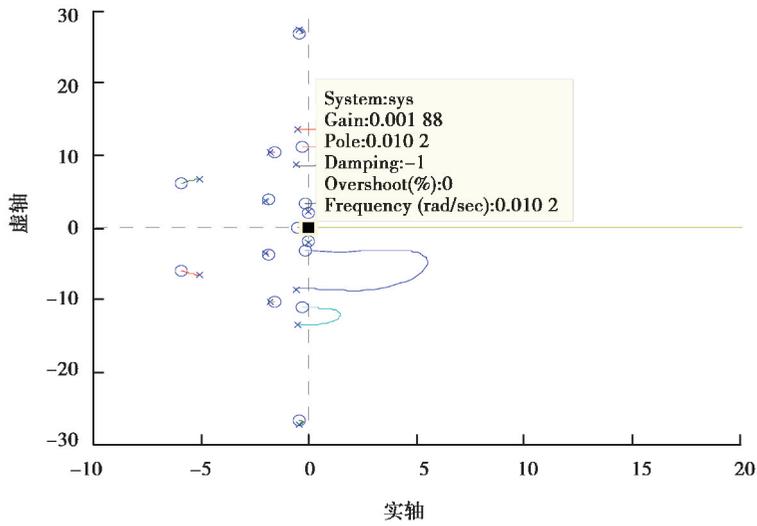


图 5 开环系统根轨迹

Fig.5 Root locus diagram of open loop system

3) 伯德图

利用 margin 函数计算得,系统增益裕量 $g_m = 0.834 4$ dB,相位裕量 $p_m = -30.779 1^\circ$,幅值裕量小于 1,相位裕量小于 0,开环系统不稳定(如图 6 所示)。

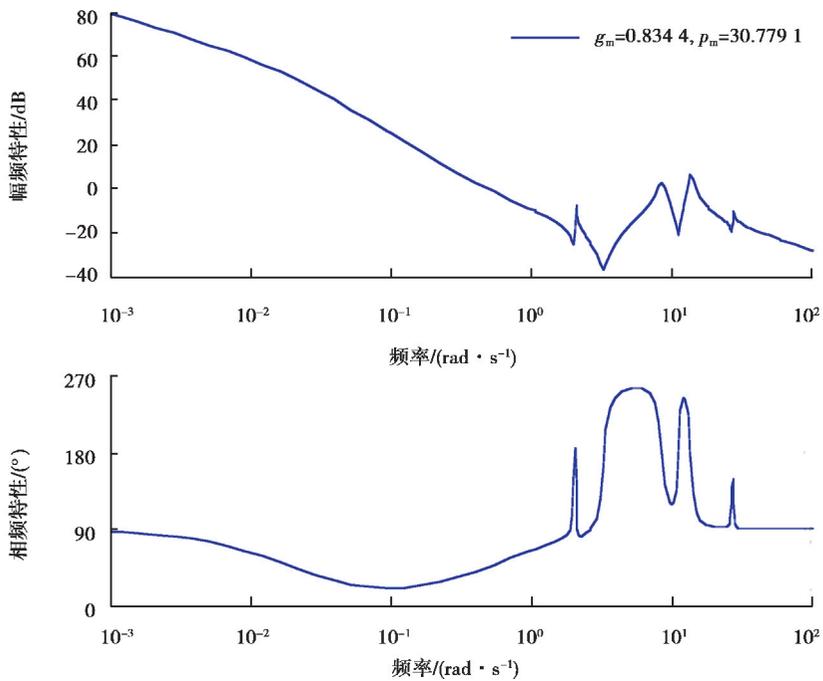


图 6 开环系统伯德图

Fig.6 Bode diagram of open loop system

4) 奈奎斯特曲线

由上图可看出,开环 Nyquist 曲线包围 $(-1, j_0)$ 点,开环系统不稳定(如图 7 所示)。

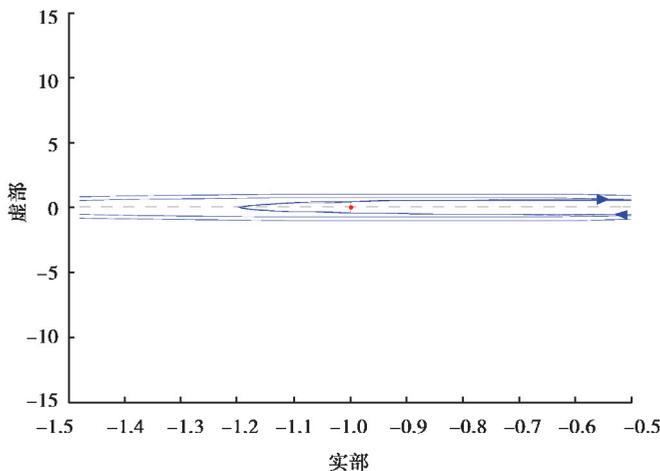


图 7 开环系统奈奎斯特曲线

Fig.7 Nyquist curve of open loop system

综上所述,以风速为 7 m/s 时的开环系统为例,利用阶跃响应、根轨迹、伯德图、Nyquist 曲线对开环系统进行分析,该系统不稳定。

2.1.2 闭环 PI 控制系统

转矩控制 Simulink 仿真模型^[8]如图 8 所示,输入 In1 为期望发电机转速(demanded generator speed),输出 Out1 为测量发电机转速(measured generator speed),Error 为上一时刻转速偏差,将转速偏差作为 PI 控制器的参考输入,经 PI 控制器模块运算后,输出期望发电机转矩(generator torque demand),然后通过基于 bladed 的分段线性化模型(Get9 表示当前风速为 9 m/s 时的叶片模型)得到测量的发电机转速。

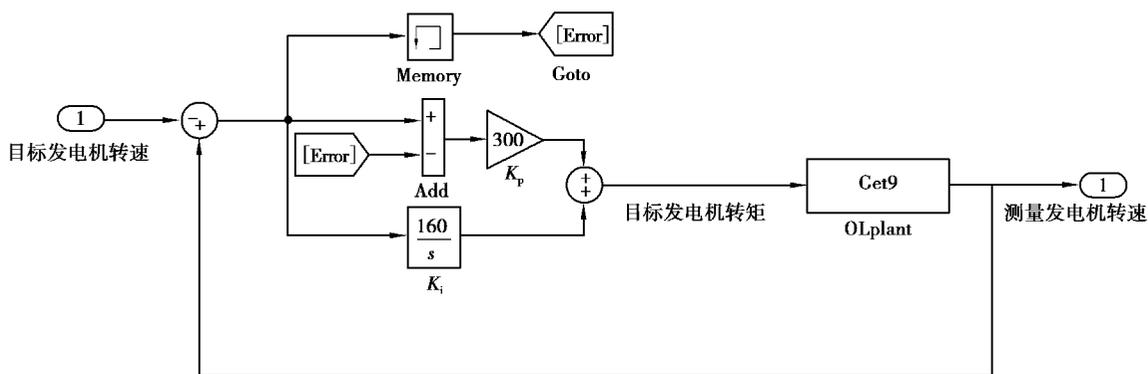


图 8 转矩 PI 控制仿真模型

Fig.8 The simulation model of PI control of torque

风速分别为 $V_{wind} = 3 \text{ m/s}$ 、 6 m/s 、 9 m/s 时,稳定性分析如下:

1) 阶跃响应曲线

由图 9 阶跃响应曲线可以看出,系统最终都衰减并趋于给定值,风速越大,阶跃响应振荡的幅值越小,稳定时间更快,系统的稳态性能和动态性能都越好。

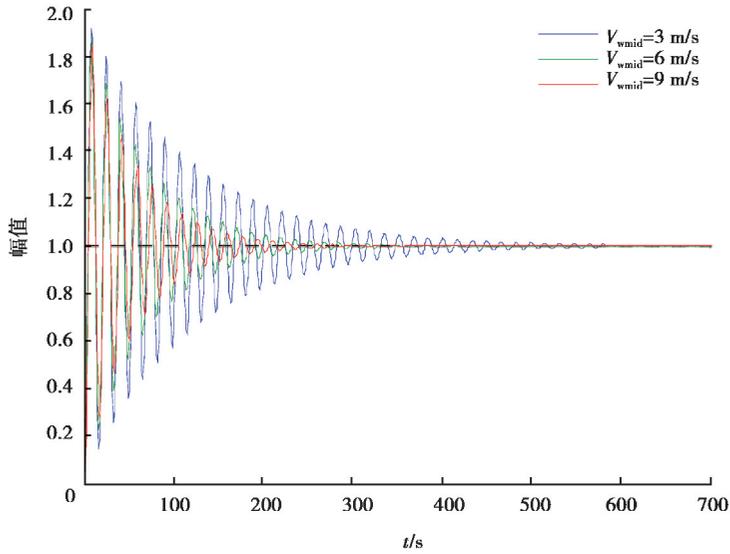


图 9 转矩 PI 闭环控制系统阶跃响应对比

Fig.9 Compare and contrast the step response of PI closed-loop control of torque

2) 根轨迹

系统的极点均在 s 的左半平面, 系统稳定, 且风速越大, 闭环极点离虚轴越远, 系统的性能更好, 与阶跃响应曲线结果一致(图 10 所示)。

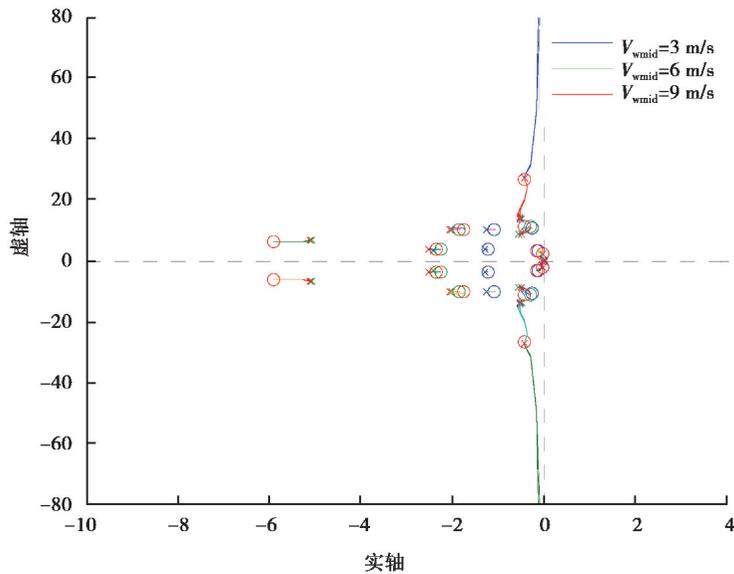


图 10 转矩 PI 闭环控制系统根轨迹对比

(注, x —极点, 0 —零点)

Fig.10 compare and contrast the root locus diagram of PI closed-loop control of torque

(note: x —poles, 0 —zeros)

3) 伯德图

由图 11 可以看出, 系统的幅值裕量均为无穷大, 相位裕量均大于零, 闭环系统稳定, 且随风速的增大, 相位裕量也在增大, 系统的稳定性能更好。

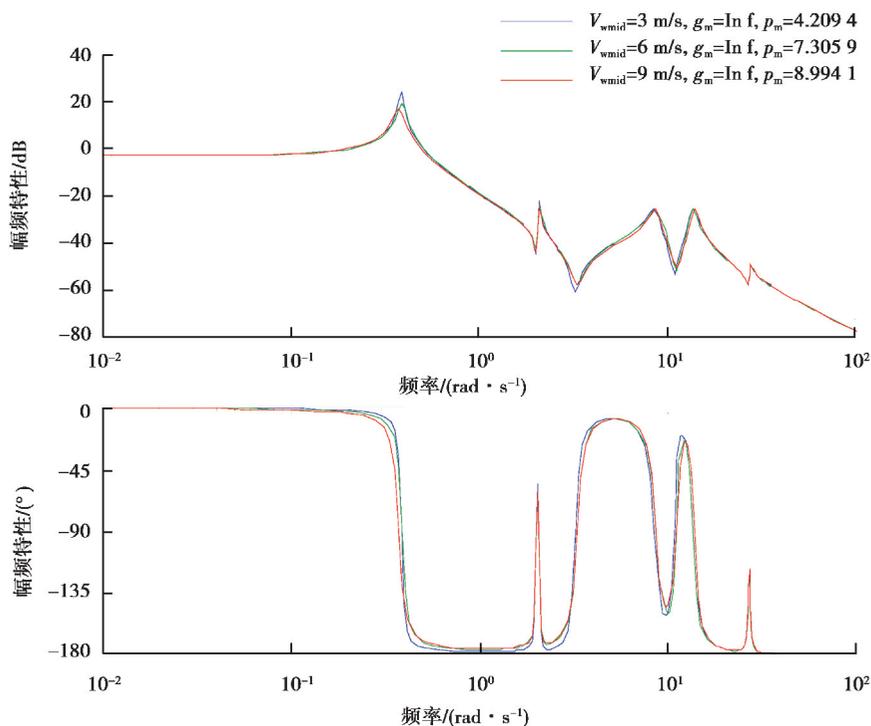


图 11 转矩 PI 闭环控制系统伯德图对比

(注: g_m 表示幅值裕量(分贝), p_m 表示相位裕量(度))

Fig.11 Compare and contrast the bode diagram of PI closed-loop control of torque

(note: g_m —gain margin (dB), p_m —phase margin (degree))

4)奈奎斯特曲线

由图 12 放大图可知,各风速下 Nyquist 曲线都不包围 $(-1, j_0)$ 点,随着风速的增大,系统的 Nyquist 曲线相对 $(-1, j_0)$ 点距离越来越远,表明系统的稳定裕度也在增大,系统的稳定程度更好,与以上分析结果一致。

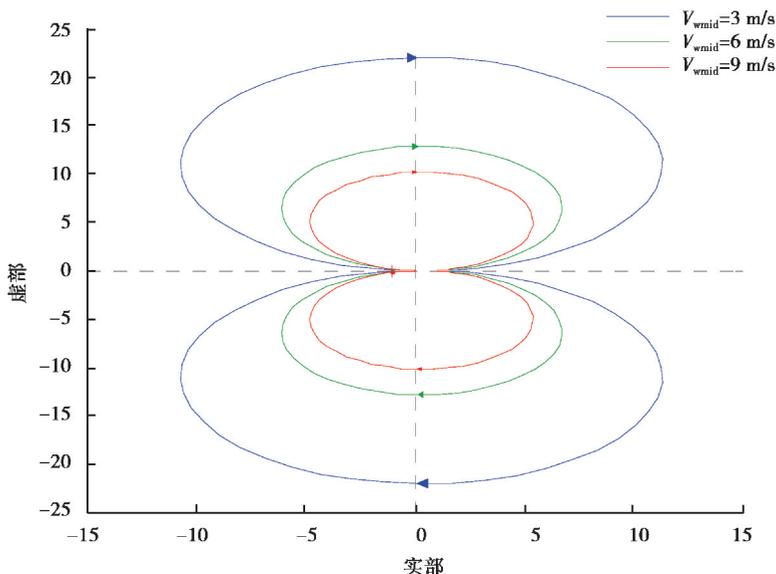


图 12 转矩 PI 闭环控制系统奈奎斯特对比

Fig.12 Compare and contrast the Nyquist curve of PI closed-loop control of torque

2.1.3 加入干扰后的控制系统

加入干扰后的转矩控制系统 Simulink 仿真模型如下所示：

图 13 中,随机取风速为 9 m/s,输入设为对应最大能量捕获的发电机期望转速 $184.82(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$,step 分别设定为在 450 s 处加入的终值为 3、30、100 的阶跃干扰,仿真该模型结果如图14—图15。

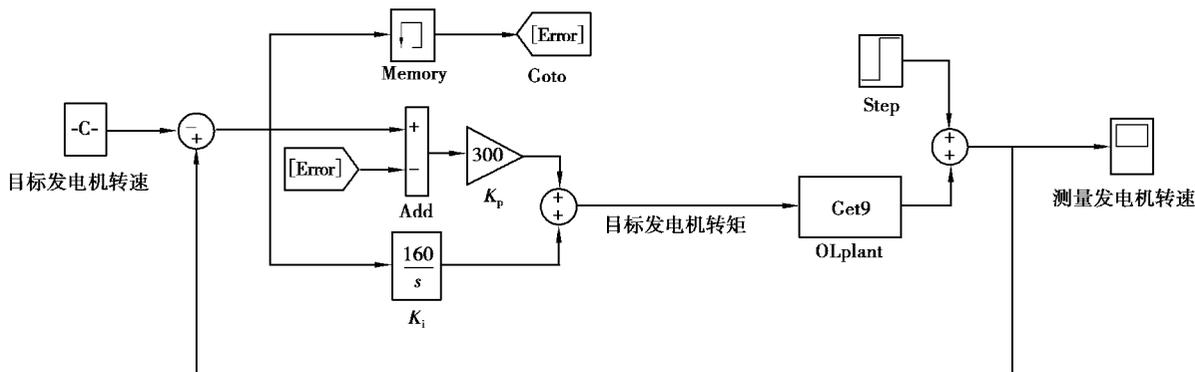


图 13 加入干扰的转矩控制仿真模型

Fig.13 The simulation model with disturbance of torque control

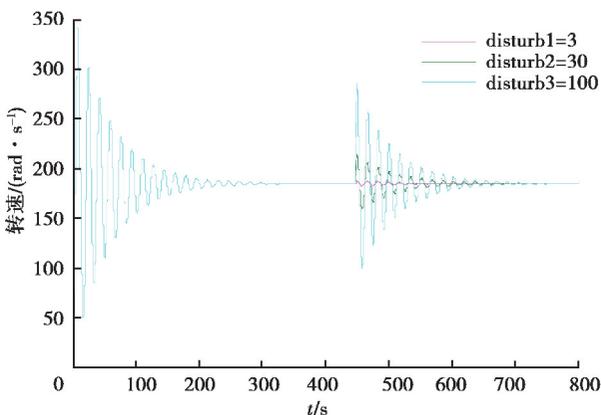


图 14 加入不同程度干扰后的仿真结果图

Fig.14 The simulation results diagram with different disturbance levels of torque control

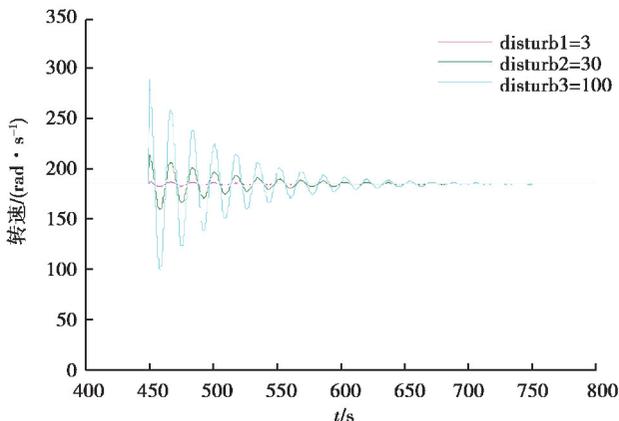


图 15 加入不同程度干扰后的局部放大图

Fig.15 Partial enlarged detail with different disturbance levels of Fig.14

由图可知,系统达到稳定状态后,450 s 处加入不同程度的干扰,其动态响应过程均能随时间的推移逐渐衰减并趋于输入设定值,系统是稳定的。

2.2 高于额定风速下系统稳定性分析

2.2.1 开环系统

在 Bladed 中计算出系统期望变桨角度和测量转速的开环传递函数后,即可在 Simulink 中搭建变桨控制开环模型并对其进行仿真。Simulink 仿真模型如图 16 所示

随机取风速为 23 m/s,与转矩控制开环模型同理,分别采用 4 种方法,分析变桨开环模型的稳定性。

1)单位阶跃响应曲线

由图 17 阶跃响应曲线可以看出,系统最终输出偏离给定值越来越远,该开环系统不稳定。

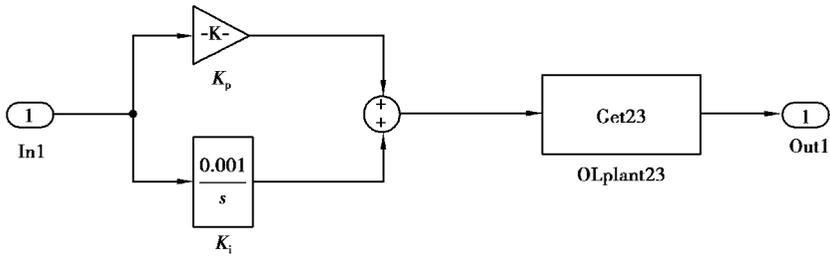


图 16 变桨控制开环模型

Fig.16 Open loop model of pitch control

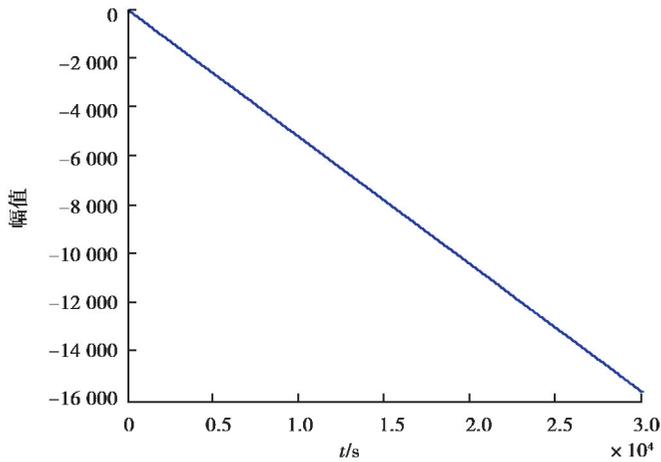


图 17 开环系统单位阶跃响应曲线

Fig.17 Unit step response curve of open loop system

2)根轨迹

由图 18 可看出,开环系统存在具有正实部极点,开环系统不稳定。

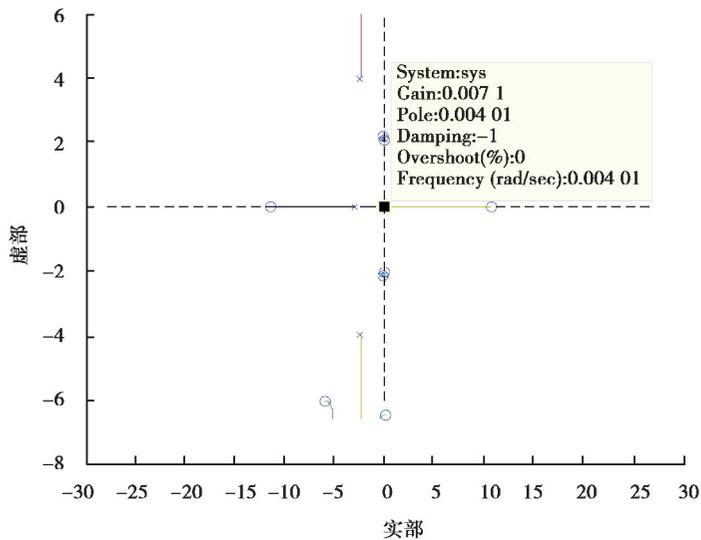


图 18 开环系统根轨迹

Fig.18 Root locus diagram of open loop system

3) 开环系统的伯德图

幅值裕量 $g_m = 19.472$ dB, $p_m = -28.613$ $^\circ$, 系统相位裕量小于零, 开环系统不稳定(如图 19 所示)。

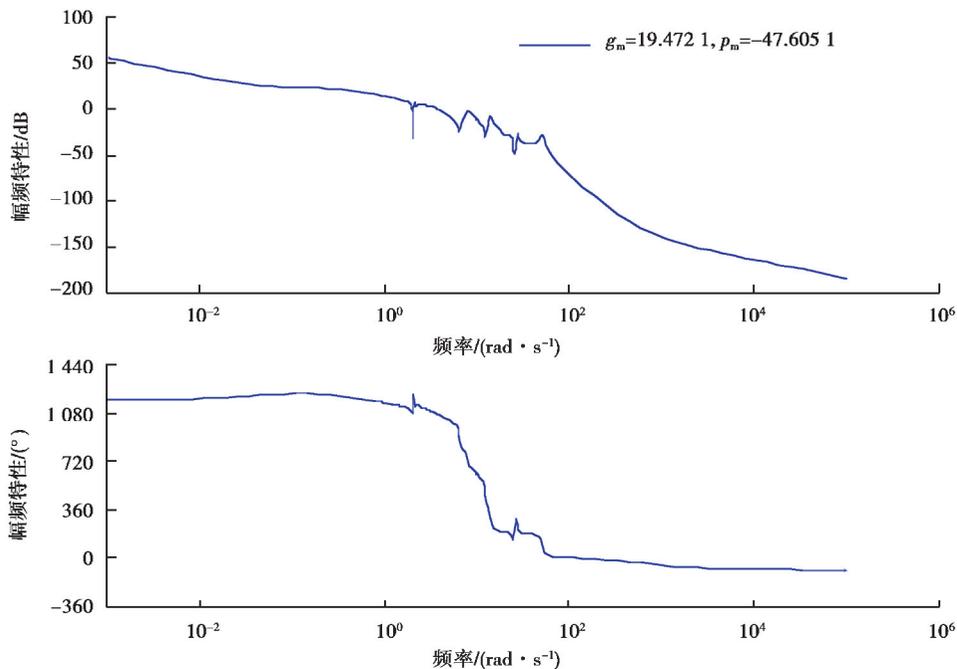


图 19 开环系统伯德图

Fig.19 Bode diagram of open loop system

4) 奈奎斯特曲线

由 Nyquist 曲线图 20 可以看出, 该曲线包围 $(-1, j_0)$ 点, 开环系统不稳定, 与阶跃响应、伯德图、根轨迹结果一致。

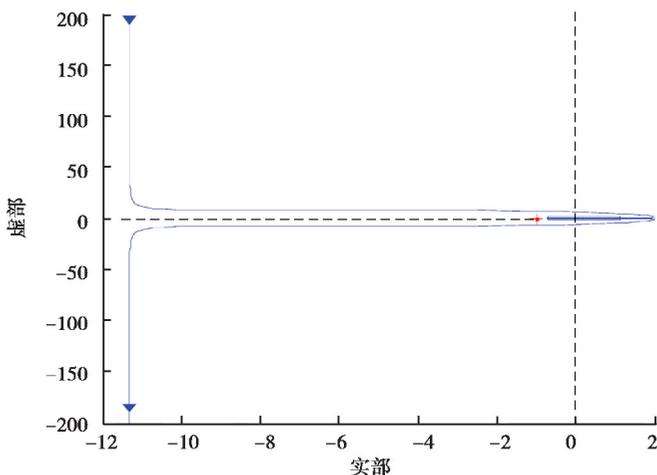


图 20 开环系统奈奎斯特曲线

Fig.20 Nyquist curve of open loop system

2.2.2 闭环 PI 控制系统

变桨控制 Simulink 仿真模型如下图所示, 输入 In1 为期望发电机转速(demanded generator speed), 输出 Out1 为测量发电机转速(measured generator speed), Error 为上一时刻转速偏差, 将转速偏差作为变桨

PI 控制器的参考输入,控制器模块输出期望变桨角度(collective pitch angle demand),然后通过 bladed 线性化系统模型(Get23)得到测量的发电机转速(如图 21 所示)。

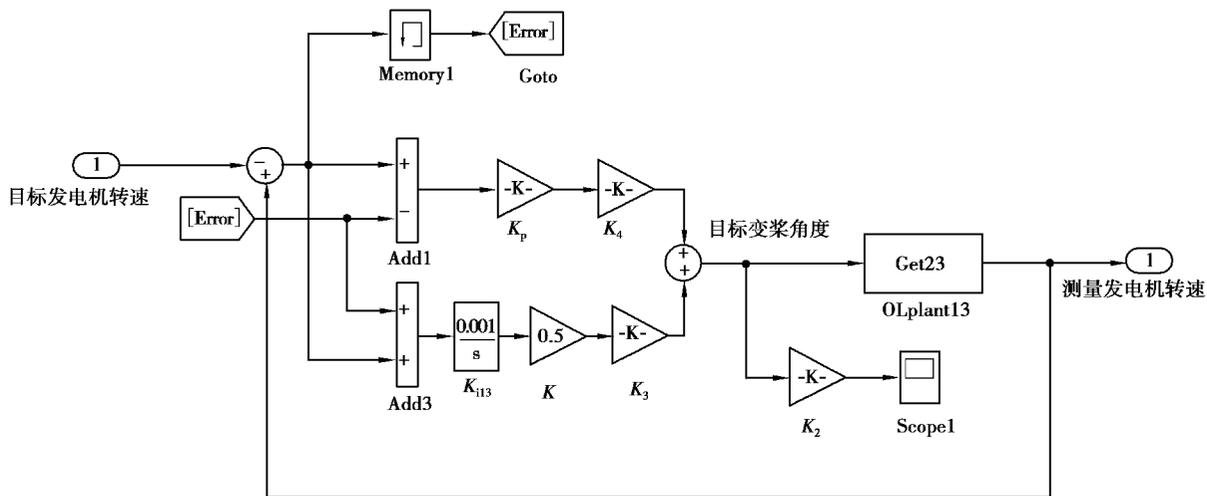


图 21 变桨 PI 控制仿真模型

Fig.21 The simulation model of PI control of pitch

风速 $V_{wind}=10\text{ m/s}$ 、 15 m/s 、 19 m/s 时稳定性分析如下:

1) 阶跃响应曲线

由图 22 可知,系统输出趋于恒定,闭环系统都是稳定的。随着风速的增大,系统的振荡幅值越来越小,收敛时间越来越快,系统能达到稳定状态。

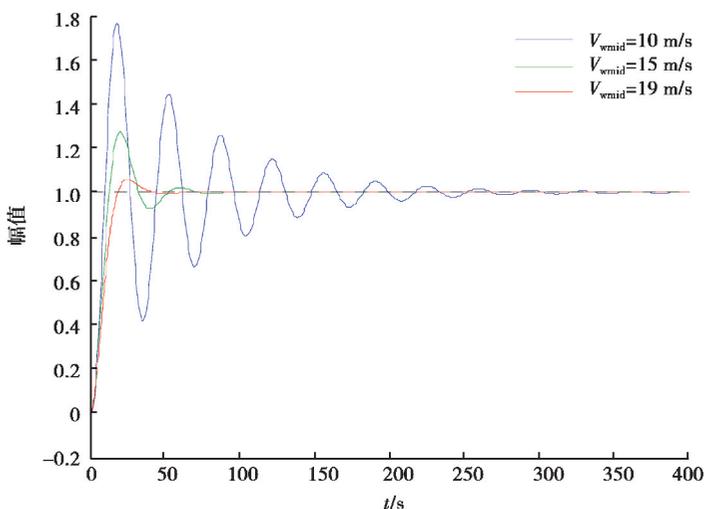


图 22 变桨 PI 闭环控制系统阶跃响应对比

Fig.22 Compare and contrast the step response of PI closed-loop control of pitch

2) 根轨迹

由根轨迹的放大图 23 知,系统的闭环极点均在 s 的左半平面,系统稳定。

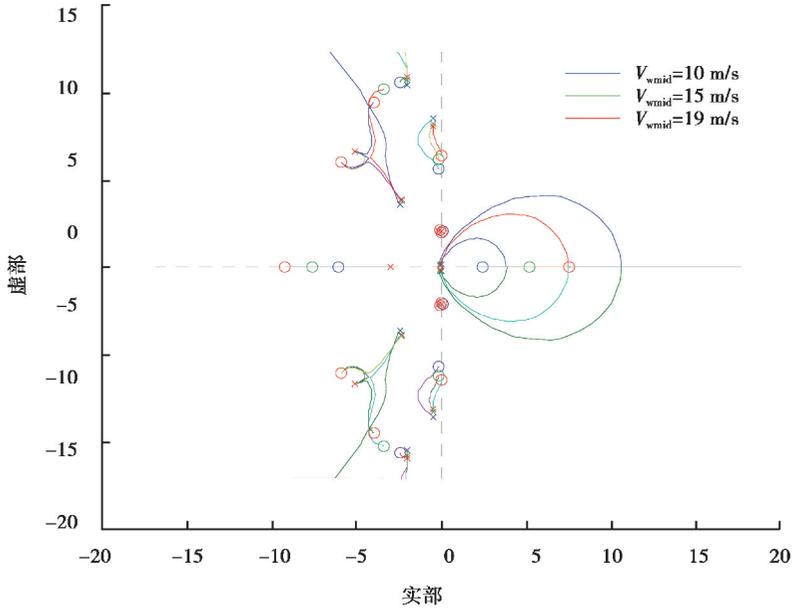


图 23 变桨 PI 闭环控制系统根轨迹对比

Fig.23 Compare and contrast the root locus diagram of PI closed-loop control of pitch (note: x—poles,0—zeros)

3)伯德图

由图 24 分析知,根据伯德图判稳条件,闭环系统稳定,随着风速的增大,稳定裕度增大,稳定性能较好。

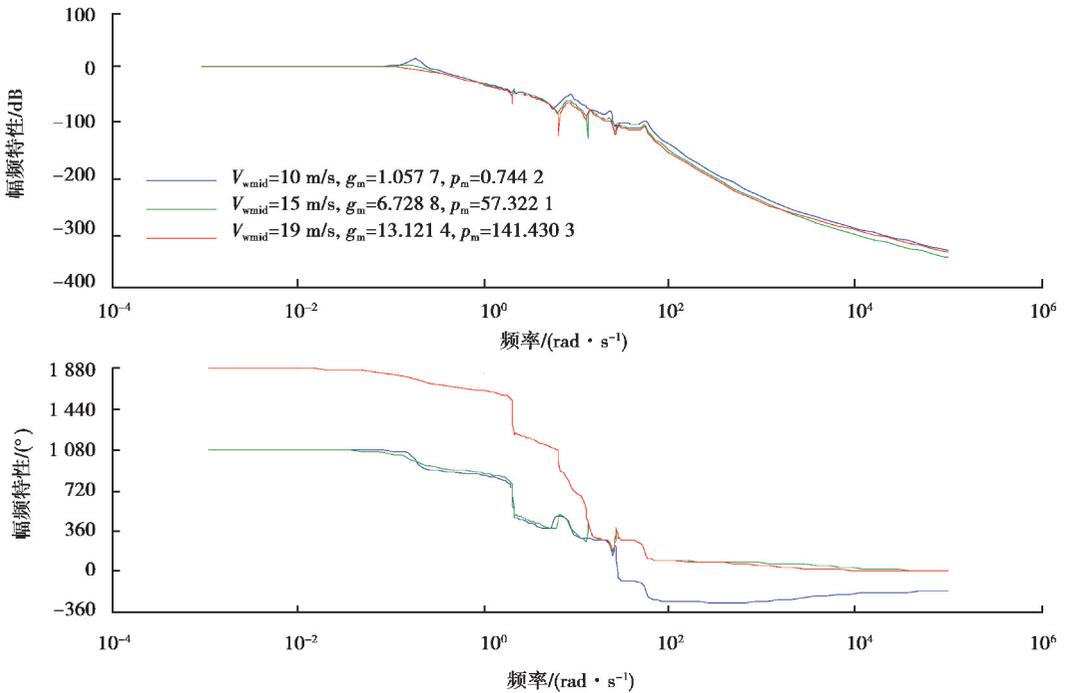


图 24 变桨 PI 闭环控制系统伯德图对比

Fig.24 compare and contrast the bode diagram of PI closed-loop control of pitch (note: g_m —gain margin (dB), p_m —phase margin (degree))

4)奈奎斯特曲线

由 Nyquist 曲线图 25 可看出,各风速下的曲线都不包围 $(-1, j_0)$ 点,且随着风速的增大,Nyquist 曲线相对 $(-1, j_0)$ 点的距离越来越远,根据 Nyquist 稳定判据判定系统稳定。

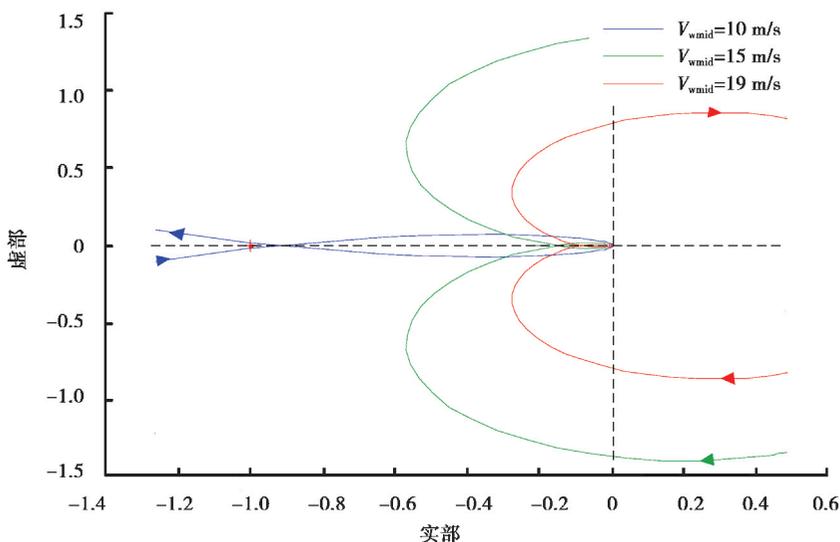


图 25 变桨 PI 闭环控制系统奈奎斯特对比

Fig.25 Compare and contrast the Nyquist curve of PI closed-loop control of pitch

2.2.3 加入干扰后的控制系统

加入干扰后的变桨控制系统 Simulink 仿真模型如图 26 所示

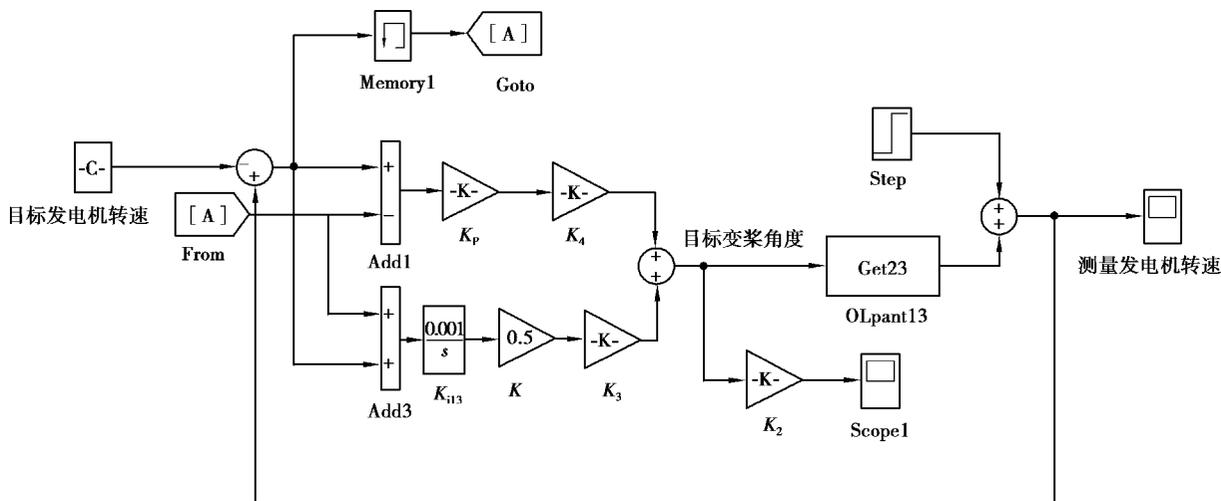


图 26 加入干扰的变桨控制仿真模型

Fig.26 The simulation model with disturbance of pitch control

随机取风速为 23 m/s,输入设为额定转速 $184.82\text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,step 分别设定为在 100 s 处加入的终值为 3、30、100 的阶跃干扰,仿真该模型结果如图 27 所示。

由图可知,系统在 50 s 处逐渐达到稳定状态,100 s 处受到干扰后,其动态响应过程随时间的推移逐渐衰减并趋于输入设定值,系统稳定。

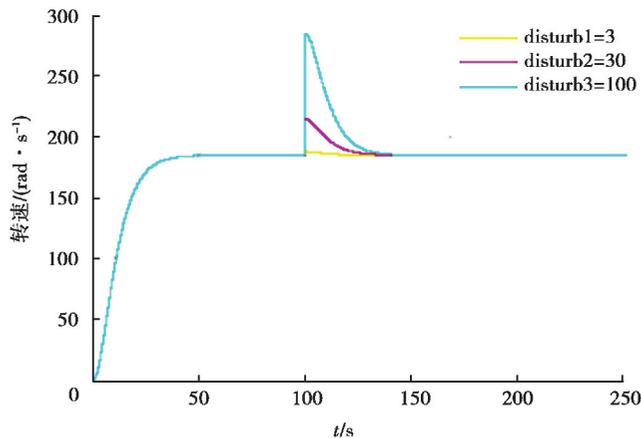


图 27 加入不同程度干扰后的仿真结果图

Fig.27 The simulation results diagram with different disturbance levels of pitch control

3 结 论

主要采用阶跃响应、根轨迹、伯德图、奈奎斯特曲线 4 种方法对风电机组转矩 PI 闭环控制系统和变桨 PI 闭环控制系统进行稳定性分析并验证结果的一致性,仿真曲线和结果知,某厂家 2MW-H111 叶片的闭环控制系统均能稳定工作。另外,验证了在系统达到稳定后对其加入一定程度的干扰时系统的稳定性情况,由分析知,系统加入干扰后,仍能在一定时间内达到稳定状态。

参考文献:

- [1] 郑刚.风电场有功功率控制系统关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2011.
ZHENG Gang. Research on key technology of wind farm active power control system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] Chen W, George W. Stability analysis of the drive-train of a wind turbine with quadratic torque control[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2009, 19(17): 1886-1895.
- [3] Dushyant P, John H, Christine M, et al. Stability of wind turbine switching control in an integrated wind turbine and rechargeable battery system; a common quadratic lyapunov function approach [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2013, 135(2): 1-27.
- [4] John L, Carlos E U, Janaka E, et al. Damping of torsional vibrations in a variable-speed wind turbine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 172-180.
- [5] Buckspan A, Pao L, Aho J. Stability analysis of a wind turbine active power control system[C]// American Control Conference (ACC), June 17-19, 2013, Washington, DC, USA; IEEE, 2013: 1418-1423.
- [6] Garrad Hassan & Parthers Ltd., Bladed Theory Manual[Z], Bladed, 2011.
- [7] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2001.
HU Shousong. Principle of automatic control[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [8] 薛定宇.控制系统计算机辅助设计[M].北京:清华大学出版社,2006.
XUE Dingyu. Computer aided design of control system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)