

文章编号:1006-2467(2022)03-0303-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.437

双馈风电场并网抑制频率振荡控制策略

刘新宇¹, 逯芯妍¹, 曾 龙², 郝正航³, 赵起放⁴, 李现伟¹, 郝同盟¹

(1. 华北水利水电大学 电力学院, 郑州 450011; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510006;
3. 贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025; 4. 河南科源水利建设工程检测有限公司, 郑州 450003)

摘 要: 针对大型风电场跨区输送电能时引起的低频振荡问题, 提出了一种阻尼系统低频振荡的单神经元自适应比例积分微分(PID)附加阻尼控制策略. 通过对双馈风电机组的动态频率响应特性进行分析, 构建了一种在单神经元自适应 PID 控制算法中引入二次型性能指标的风电场阻尼系统振荡控制器. 通过对励磁变频器进行自适应调节, 促使风电场快速发出有功功率, 产生最大正阻尼, 抑制系统低频振荡. 利用 MATLAB 搭建含风电场的四机两区域电力系统仿真模型, 通过对比验证了所提方法能够在系统发生低频振荡时有效抑制同步发电机功角的摇摆, 改善系统惯性响应, 降低电网发生低频振荡的风险.

关键词: 双馈异步风力发电机; 低频振荡; 单神经元比例积分微分算法; 附加阻尼控制

中图分类号: TM 614; TM 712 **文献标志码:** A

Control Strategies for Suppressing Frequency Oscillation of Doubly-Fed Wind Farms Connected to Grid

LIU Xinyu¹, LU Xinyan¹, ZENG Long², HAO Zhenghang³
ZHAO Qifang⁴, LI Xianwei¹, HAO Tongmeng¹

(1. School of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. Henan Keyuan Water Conservancy Construction Engineering Inspection Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Aimed at the problem of low-frequency oscillations caused by cross-region power transmission of large-scale wind farms, a single neuron adaptive proportion integration differentiation (PID) additional damping control strategy for low-frequency oscillations of the damping system is proposed in this paper. By analyzing the dynamic frequency response characteristics of doubly-fed wind turbines, a wind farm damping system oscillation controller is constructed by introducing quadratic performance indicators into the single neuron adaptive PID control algorithm. By adaptively adjusting the excitation frequency converter, the wind farm can quickly generate active power and the maximum positive damping, and suppress the low-frequency oscillation of the damping system. MATLAB is used to build a four-machine two-region power system simulation model with a wind farm. The comparison verifies that the method proposed in this paper

收稿日期: 2021-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51467003), 河南省高等学校重点科研项目(21A120006)

作者简介: 刘新宇(1976-), 男, 河南省南阳市人, 副教授, 从事控制理论与控制工程、新能源发电与智能电网、模式识别与智能系统研究.

通信作者: 曾 龙, 男, 在站博士后; E-mail: zenglong2404@qq.com.

can effectively suppress the swing of the power angle of the synchronous generator when low-frequency oscillation occurs in the system, improve the inertial response of the system, and reduce the risk of low-frequency oscillation in the power grid.

Key words: doubly-fed induction generator; low-frequency oscillations; single neural proportion integration differentiation (PID) algorithm; additional damping control

随着我国“双碳”目标的提出,以风电为代表的可再生能源发电并网规模不断增大.风力发电的间歇性、不稳定性威胁着电力系统安全、稳定地运行.当大规模风电场集中接入电力系统后,一方面,由于双馈异步发电机(DFIG)的“机械-电耦合”特性,其机械量和电量相互解耦,这使得其无法为电网提供机械惯性,从而削弱系统阻尼并降低了系统稳定性^[1-2].另一方面,大多数风电场都位于偏远地区,远离电力系统,输电线路的等效电抗大于靠近负荷中心的线路等效电抗.因此,风电场相当于连接到了一个弱电网.近年来,越来越多的研究者对风电并网后系统的阻尼特性及相应控制策略进行了深入研究.

对于风电场并网后系统阻尼特性的研究,文献[3-4]认为在风电机组类型确定的情况下,接入距离越近、风电渗透率越低,阻尼效果越好.文献[5]分析了虚拟惯量控制对风电并网系统阻尼特性的影响,提出利用风电场中配置的静止同步补偿器增强系统动态稳定的控制策略.文献[6-7]提出了引入反映同步发电机阻尼绕组特性的暂态阻尼环节的解决方法,解决一次调频与传统阻尼特性的相互影响问题.文献[8-9]分析了实施惯量控制的风电场在弱电网条件下会参与系统低频振荡并引入新弱阻尼振荡,以此提出了一种双层阻尼控制体系来增强风电场的阻尼特性.文献[10]提出了一种基于附加电压控制器的阻尼控制方法,该阻尼控制器可以充分抵消延时影响,从而可以改善阻尼频率振荡.

在增强含风电场电力系统阻尼的控制策略方面,文献[11]提出以系统频率偏差为输入,在双馈风机上设计了附加阻尼控制器,为系统注入正阻尼.文献[12]提出了一种在DFIG转子侧增加阻尼控制器的混合模型高级控制策略,该策略可以有效地提高风机的故障穿越能力.文献[13-14]提出了一种基于全维状态空间反馈的附加阻尼控制器,调节各换流站的有功功率,从而抑制系统的振荡.文献[15]提出一种基于史密斯预估-自抗扰控制的双馈风电场广域附加阻尼控制器,能够有效地抑制区间低频振荡.文献[16]提出通过将混合的多个有源阻尼回路分别集成到有功和无功功率控制器中,可以同时

改善所有振荡模式的阻尼控制.文献[17]基于二次最优控制原理设计了多频段高压直流附加控制器,可抑制交流系统中因功率不平衡引起的振荡.

已有的研究为风电场阻尼电力系统奠定了理论基础,也提出了许多解决问题的方法.然而,对于风电场提供正阻尼还是负阻尼的条件并没有给出明确的理论依据.本文在研究双馈风电场对系统振荡阻尼作用的基础上,推导出风电场提供正阻尼的解析条件,并以此提出了一种变增益神经元自适应控制方法,以提高双馈风电场并网抑制低频振荡的动态品质.

1 风电场并网的阻尼特性机理分析

1.1 不含风电场的电力系统固有阻尼特性

考虑到电力系统拓扑结构复杂性及风电接入电网形式多样性,为简化分析过程,本文重点研究风电经“风火打捆”系统,并考虑由远距离高压输电线路并入大电网的典型情况,其结构图如图1所示.其中: H_1 为同步发电机,代表常规电站;风电场代表风电场群; P_1 为 H_1 输出的有功功率; P_w 为风电场输出的有功功率; Q_w 为风电场输出的无功功率; E 为 H_1 的内电势; δ_1 为 E 的相角; U_A 、 U_B 分别为节点A、B的电压幅值; δ_A 为节点A电压相角; X_1 和 X_2 为输电线路的电抗.

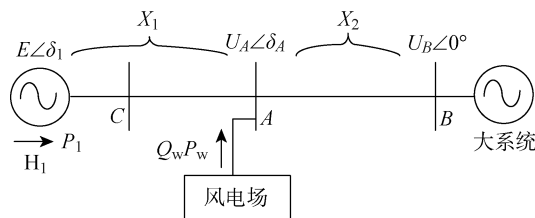


图1 “风火打捆”系统结构图

Fig. 1 Power system with wind farm

当图1中不包含风电场,且假设 H_1 的机械输入功率为常值,则可以得到小信号作用下 H_1 的转子运动方程:

$$\Delta \ddot{\delta}_1 + \frac{D_1}{T_1} \Delta \dot{\delta}_1 + \frac{1}{T_1} \Delta P_1 = 0 \quad (1)$$

式中: ΔP_1 为电磁功率增量; $\Delta \delta_1$ 为电压相角增量;

T_1 为 H_1 惯性时间常数; D_1 为 H_1 的阻尼系数.

在不考虑励磁系统作用且假定 E 恒定的情况下,可得:

$$\Delta P_1 = \frac{EU_B}{X_1 + X_2} \cos \delta_{1,0} \Delta \delta_1 \quad (2)$$

式中: $\delta_{1,0}$ 为电压相角初值. 令 $K_1 = \frac{EU_B}{X_1 + X_2} \times \cos \delta_{1,0}$ 为同步发电机转矩系数,则

$$\Delta P_1 = K_1 \Delta \delta_1 \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)得到:

$$\Delta \ddot{\delta}_1 + \frac{D_1}{T_1} \Delta \dot{\delta}_1 + \frac{K_1}{T_1} \Delta \delta_1 = 0 \quad (4)$$

对比典型二阶系统特征方程的系数可知,系数 $\frac{D_1}{T_1}$ 包含了系统阻尼项. 显然,系统具有正阻尼性质.

1.2 包含风电场的电力系统阻尼性质

阻尼机电振荡可通过加入动态有功发生装置来实现,下面分析双馈风电机组的阻尼机理. 假设风电场的接入点在图1中节点A处,由图1可得:

$$\Delta P_1 + \Delta P_w = \frac{U_{A,0} U_B}{X_2} \cos \delta_{A,0} \Delta \delta_A + \frac{U_B}{X_2} \sin \delta_{A,0} \Delta U_A \quad (5)$$

$$\Delta P_1 = \frac{E}{X_1} \sin(\delta_{1,0} - \delta_{A,0}) \Delta U_A + \frac{EU_{A,0}}{X_1} \cos(\delta_{1,0} - \delta_{A,0}) (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_A) \quad (6)$$

式中: ΔP_w 为风电场输出有功功率增量; ΔU_A 为节点A的电压幅值增量; $\delta_{A,0}$ 为节点A电压相角初值; $U_{A,0}$ 为节点A电压幅值初值. 联立式(5)和(6)并消去 $\Delta \delta_A$ 后可得:

$$\Delta P_1 = \frac{\cos(\delta_{1,0} - \delta_{A,0}) \cos \delta_{A,0}}{\frac{X_2}{U_{A,0} U_B} \cos(\delta_{1,0} - \delta_{A,0}) + \frac{X_1}{EU_{A,0}} \cos \delta_{A,0}} \Delta \delta_1 - \frac{\cos(\delta_{1,0} - \delta_{A,0})}{\cos(\delta_{1,0} - \delta_{A,0}) + \frac{X_1 U_B}{X_2 E} \cos \delta_{A,0}} \Delta P_w + \Delta U_A \times \frac{\sin(\delta_{1,0} - \delta_{A,0}) \cos \delta_{A,0} + \sin \delta_{A,0} \cos(\delta_{1,0} - \delta_{A,0})}{\frac{X_2}{U_B} \cos(\delta_{1,0} - \delta_{A,0}) + \frac{X_1}{E} \cos \delta_{A,0}} \quad (7)$$

由于电力系统具有 P - Q 解耦性,电压微变 ΔU_A 主要受风电场无功的影响^[18]. 在讨论风电场对系统的阻尼作用时,是通过调制 ΔP_w 以产生阻尼转矩实现的,而无功为恒定模式,所以不考虑风场无功增量引起的节点电压变化(即 $\Delta U_A \approx 0$),也不再考虑由 ΔU_A 引起的 ΔP_1 . 根据文献[19]的定义,即

$$\Delta P_w(j\omega) = \Delta \omega_1(j\omega) G(j\omega)$$

其中: $G(j\omega)$ 为风电机组作为受电网频率作用的功率源; $\Delta \omega_1$ 为 H_1 的转子角频率微变量. ΔP_w 可分解为同步转矩分量和阻尼转矩分量,可得到 ΔP_w 作用下的 ΔP_1 的表达式:

$$\Delta P_1 = [-K_2 \sin G(j\omega) + K_3] \Delta \delta_1 - K_2 \cos G(j\omega) \Delta \dot{\delta}_1 \quad (8)$$

$$K_2 = \frac{\cos(\delta_{1,0} - \delta_{A,0}) |G(j\omega)|}{\cos(\delta_{1,0} - \delta_{A,0}) + \frac{X_1 U_B}{X_2 E} \cos \delta_{A,0}} \quad (9)$$

$$K_3 = \frac{\cos(\delta_{1,0} - \delta_{A,0}) \cos \delta_{A,0}}{\frac{X_2}{U_{A,0} U_B} \cos(\delta_{1,0} - \delta_{A,0}) + \frac{X_1}{EU_{A,0}} \cos \delta_{A,0}} \quad (10)$$

将式(8)代入式(1)得到含风电场的转子运动方程:

$$\Delta \ddot{\delta}_1 + \left(\frac{D_1}{T_1} - \frac{K_2}{T_1} \cos G(j\omega) \right) \Delta \dot{\delta}_1 + \left(\frac{K_3}{T_1} - \frac{K_2}{T_1} \sin G(j\omega) \right) \Delta \delta_1 = 0 \quad (11)$$

对比式(4)、式(11)可以看出,当风电场切入电网后,系统阻尼增加了 $-\frac{K_2}{T_1} \cos G(j\omega)$. 则可知,只有 $\frac{K_2}{T_1} \cos G(j\omega) < 0$ 时,系统阻尼为正,即风电场为电力系统提供了正阻尼.

1.3 风电场并网产生阻尼特性分析

由1.2节的讨论可知:当 $0^\circ < \angle G(j\omega) < 90^\circ$ 或 $270^\circ < \angle G(j\omega) < 360^\circ$ 时,风电场并网后产生的阻尼为负;当 $\angle G(j\omega) = 90^\circ$ 时,风电场并网后产生的阻尼为0;当 $90^\circ < \angle G(j\omega) < 270^\circ$ 时,风电场并网后产生的阻尼为正;当 $\angle G(j\omega) = 180^\circ$,风电场并网后产生的阻尼最大.

2 利用风电场阻尼系统振荡控制器的设计

2.1 单神经元自适应比例积分微分控制原理

单神经元自适应比例积分微分(PID)控制系统的结构图如图2所示. 其中: x_i ($i = 1, 2, 3$) 为输入量; $r(t)$ 为设定值; $y(t)$ 为输出; $e(t)$ 为 $r(t)$ 与 $y(t)$

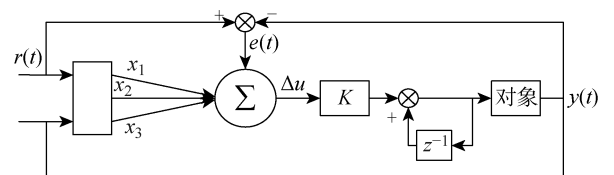


图2 单神经元自适应PID控制系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of single neuron PID adaptive control

的误差值; Δu 为控制信号; K 为输出放大倍数; z^{-1} 为反馈信号. 系统中的单神经元控制器通过学习, 持续对 PID 参数进行实时调整, 从而实现自适应控制. 由于其结构简单、鲁棒性较强, 单神经元自适应控制在一些特殊控制领域应用较广.

在 t_k 时刻, 增量式 PID 控制算法可表示为

$$\Delta u(t_k) = k_p(e(t_k) - e(t_k - 1)) + k_i e(t_k) + k_d(e(t_k) - 2e(t_k - 1) + e(t_k - 2)) \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} x_1(t_k) &= e(t_k) \\ x_2(t_k) &= e(t_k) - e(t_k - 1) \\ x_3(t_k) &= e(t_k) - 2e(t_k - 1) + e(t_k - 2) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: k_p, k_i, k_d 为单神经元的加权值, 并设其为 w'_i , w'_i 的权值设为 w_i , 同时引进 K , 可得:

$$\Delta u(t_k) = K \left(\sum_{i=1}^3 w'_i x_i(t_k) \right) \quad (14)$$

则单神经元自适应 PID 控制器的输出为

$$u(t_k) = u(t_k - 1) + K \sum_{i=1}^3 w'_i(t_k) x_i(t_k) \quad (15)$$

$$w'_i(t_k) = \frac{w_i(t_k)}{\sum_{i=1}^3 |w_i(t_k)|}$$

K 值的选择很重要. K 值越大, 则快速性越好, 但也会导致超调量大, 可能会导致系统的不稳定; K 值选择过小, 则快速性变差.

2.2 励磁变频器的阻尼控制策略

通过改变风电场的动态频率特性, 可以影响系统阻尼特性, 便可使风电场为系统提供更多的正阻尼. 由此提出阻尼控制的基本思路: 根据产生最大正阻尼的条件, 通过智能附加控制, 采集 H_1 的转子角频率微变量 $\Delta\omega_1$ (转子小值振荡期间, 节点 A 处频率增量与 H_1 的转子角频率微变量值相等), 自适应校正各风电机组的 $G(j\omega)$, 使机电特征角频率 ω_0 处的 $\angle G(j\omega_0)$ 尽可能接近 180° , 在不影响双馈风电机组稳定以及风机不会出现过载情况的前提下, 使 $|G(j\omega_0)|$ 达最大值^[19]. 根据上述思路, 在转子侧变频器的常规双闭环比例积分 (PI) 调节的基础上加入附加阻尼控制环节, 如图 3 所示. 其中: $P_{\text{ref}}, Q_{\text{ref}}$ 为定子有功、无功功率参考值; P_s, Q_s 为定子有功、无功功率测量值; $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ 分别为定子和转子 d, q 轴电流分量; l_m 为定转子等效互感; l_r 为转子等效自感; ω_s 为定子角速度; U_{dr}, U_{qr} 为转子 d, q 轴电压分量. 附加阻尼控制环节中, k 为增益环节, 可控制系统产生阻尼的效果; $\frac{sT_w}{1+sT_w}$ 为隔直环节, 功能是进行信号过滤; T_w 为时间常数; s 为拉氏变换中间变量; 虚线框部分为智能附加阻尼控制器, 由变增益单

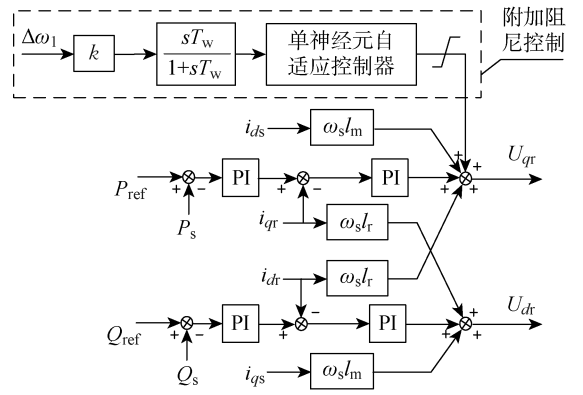


图 3 带有附加阻尼控制的励磁控制器结构图

Fig. 3 Structure diagram of excitation controller with additional damping control

神经元环节组成.

单神经元自适应 PID 控制原理见 2.1 节. 为了实现输出误差和控制增量的同时约束控制, 本文将采用一种基于二次型性能指标的学习算法^[20]. 引入的二次型性能指标通过使输出误差和控制增量加权平方和为最小来调整加权系数, 从而可以间接实现对二者的约束控制.

这里取系统性能指标表达式如下:

$$E(t_k) = \frac{1}{2} M (r(t_k) - y(t_k))^2 + N (\Delta u(t_k))^2 \quad (16)$$

式中: M, N 分别为事先设定的输出误差和控制增量的加权系数; $r(t_k)$ 和 $y(t_k)$ 为 t_k 采样时刻的系统的参考输入和输出.

为了实现系统的误差逐渐减小, 应该使 w_i 与误差的负梯度成正比, 即:

$$\Delta w_i = -\eta \nabla E(t_k) \quad (17)$$

式中: η 为正常数. 则误差梯度表达式为

$$\nabla E(t_k) = -M b_0 z(t_k) x_i(t_k) +$$

$$NK \sum_{i=1}^3 (w_i(t_k) x_i(t_k)) x_i(t_k) \quad (18)$$

式中: b_0 为调整系数; $z(t_k)$ 为 t_k 采样时刻的教师信号. 将式 (18) 代入式 (17), 可得:

$$\Delta w_i(t_k) = \eta_i K [M b_0 z(t_k) x_i(t_k) - NK \sum_{i=1}^3 (w_i(t_k) x_i(t_k)) x_i(t_k)] \quad (19)$$

又由 $w_i = w(t_k - 1) + \Delta w_i$ 可得:

$$w_1(t_k) = w_1(t_k - 1) + \eta_1 K (M b_0 z(t_k) x_1(t_k) -$$

$$NK \sum_{i=1}^3 w_i(t_k) x_i(t_k) x_1(t_k))$$

$$w_2(t_k) = w_2(t_k - 1) + \eta_2 K (M b_0 z(t_k) x_2(t_k) -$$

$$NK \sum_{i=1}^3 w_i(t_k) x_i(t_k) x_2(t_k))$$

$$\begin{aligned} \omega_3(t_k) = & \omega_3(t_k - 1) + \eta_D K (M b_0 z(t_k) x_3(t_k) - \\ & NK \sum_{i=1}^3 \omega_i(t_k) x_i(t_k) x_3(t_k)) \end{aligned} \quad (20)$$

式中: η_P 、 η_I 、 η_D 分别为比例、积分、微分下的正常数. 则可以得到:

$$\left. \begin{aligned} x_1(t_k) &= e(t_k) \\ x_2(t_k) &= e(t_k) - e(t_k - 1) \\ x_3(t_k) &= (\Delta e(t_k))^2 = \\ & e(t_k) - 2e(t_k - 1) + e(t_k - 2) \\ z(t_k) &= e(t_k) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中: $\Delta e(t_k) = e(t_k) - e(t_k - 1)$.

至此,式(16)~(21)就是基于二次型性能指标学习算法的单神经元自适应 PID 控制算法. 相比于 2.1 节的增量式 PID 控制算法,采用二次型性能指标学习算法来计算控制律可以得到更优的控制效果. 将此算法运用至附加阻尼控制器,为使算法具有更强的自适应能力,对引进的比例系数 K 进行优化. 令:

$$K = \lambda e^{\text{sgn}|\Delta\omega_1|t} \quad (22)$$

式中: λ 为一个正实数. 当 $\Delta\omega_1 = 0$ 时, $\text{sgn}|\Delta\omega_1| = 0$, $K = \lambda$; 当 $\Delta\omega_1 \neq 0$ 时, $\text{sgn}|\Delta\omega_1| = 1$, K 随 $|\Delta\omega_1|$ 的增大而增大,实现自适应过程,优化调节效果.

由图 3 可知,在附加阻尼控制环节,根据输入量 $\Delta\omega_1$,通过智能控制器自适应调节比例系数 K 及 k_p 、 k_i 、 k_d 参数,自动进行相位补偿和放大增益调整,以保证校正后的 $\angle G(j\omega_1)$ 接近于 180° ;放大环节 K 的增益尽可能大. 通过以上阻尼控制策略的分析可知,控制过程只需机组自身参数,具有避开电力系统的参数设计及调试、无需改变硬件结构的优势,励磁变频器的参数整定在考虑到实用化上也会更加方便.

3 算例验证

3.1 仿真参数

本文运用 MATLAB/Simulink 软件建立含风电机组的区域电力系统模型,区域电力系统模型采用 IEEE 四机两区域系统,系统的结构图如图 4 所示.

区域 1 包含 H_1 、 H_2 两个同步发电机组,区域 2 包含 H_3 、 H_4 两个同步发电机组, L_1 、 L_2 为联络线所带重负荷,同步发电机组的额定容量都为 900 MW,且 4 台机组规格相同,参数如表 1 和 2 所示. 其中: X_d 、 X_q 分别为 d 、 q 轴电抗; X_L 为感抗; X'_d 、 X'_q 分别为 d 、 q 轴暂态电抗; X''_d 、 X''_q 分别为 d 、 q 轴次暂态电

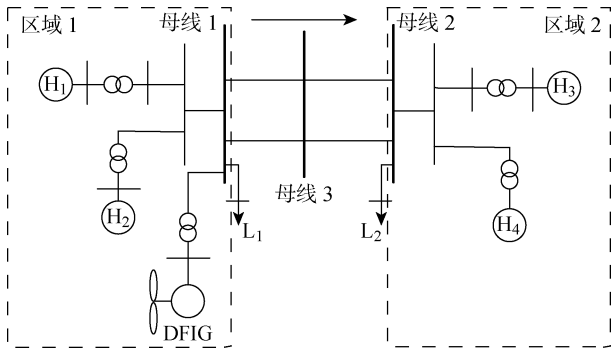


图 4 风电接入的四机两区域电力系统模型

Fig. 4 Four-machine two-region power system model with wind power integration

表 1 四机两区域系统中同步机的参数

Tab. 1 Parameters of synchronous machine in four machines and two areas

| 参数 | 取值 | 参数 | 取值 |
|------------------|------|-----------------|---------|
| X_d (p. u.) | 1.80 | X''_d (p. u.) | 0.25 |
| X_q (p. u.) | 1.70 | X''_q (p. u.) | 0.25 |
| X_L (p. u.) | 0.20 | R_a (p. u.) | 0.002 5 |
| X'_d (p. u.) | 0.30 | T'_{d0} / s | 8.0 |
| X'_q (p. u.) | 0.55 | T'_{q0} / s | 0.4 |
| T''_{d0} / s | 0.03 | T_1 / s | 6.5 |
| T''_{q0} / s | 0.05 | T_2 / s | 6.175 |
| S_b / (MV · A) | 900 | U_b / kV | 20 |

表 2 同步机的功率输出参数

Tab. 2 Power output parameters of synchronous machine

| 同步机 | 电压 (p. u.) | 有功功率 / MW | 无功功率 / MVar |
|-------|---------------------------|-----------|-------------|
| H_1 | $1.03 \angle 20.0^\circ$ | 700 | 185 |
| H_2 | $1.01 \angle 10.5^\circ$ | 700 | 235 |
| H_3 | $1.03 \angle -6.8^\circ$ | 719 | 176 |
| H_4 | $1.01 \angle -17.0^\circ$ | 700 | 202 |

抗; T'_{d0} 、 T'_{q0} 为 d 、 q 轴开路暂态时间常数; T''_{d0} 、 T''_{q0} 为 d 、 q 轴开路次暂态时间常数; S_b 为视在功率; U_b 为基准电压; R_a 为电枢电阻; T_1 为 H_1 、 H_2 惯性时间常数; T_2 为 H_3 、 H_4 惯性时间常数. 双馈风机的接入容量为 150 MW,假设所有风机具有相同的工作状态,采用单机等值模型,即运用 100 台 1.5 MW 的风机代替,风电场通过 10 km 长的输电线接入四机两区域系统的母线 1 处.

3.2 DFIG-PSS 附加控制器

为了突出本文所提控制器的有效性,通过设计电力系统稳定器 (PSS) 附加控制器进行对比. 该控制器采用 PSS 控制理论,引入 PSS 控制结构到

DFIG 的有功功率控制环节中,其控制框图如图 5 所示,其中: T_3 、 T_4 为时间常数.

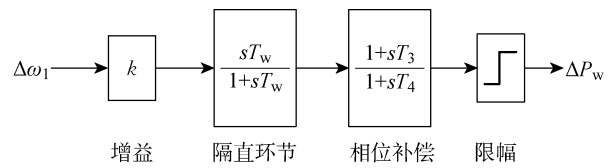


图 5 DFIG-PSS 附加控制框图

Fig. 5 Block diagram of DFIG-PSS additional control

3.3 仿真分析

3.3.1 三相短路故障情形 为测试所设计的控制器是否能有效抑制低频振荡,设置了三相短路故障.在如图 4 所示区域的电力系统进行仿真实验,系统运行至 20 s 时,在系统中母线 3 处设置一个持续时长为 0.1 s 的三相短路故障,从而诱发系统出现低频振荡.通过示波器观测系统中各变化量,将单神经元附加控制器与无附加控制、DFIG-PSS 附加控制的情况进行对比,判断单神经元附加控制策略抑制系统低频振荡的有效性.

图 6 为区域 1 同步机相对区域 2 同步发电机组的相对转子角响应曲线.从图 6 中可以看出,与无附加阻尼控制器相比,DFIG-PSS 附加控制和单神经元附加控制两种情况振荡情况的稳定时间皆有提前.与 DFIG-PSS 附加控制相比,系统采用单神经元附加控制器的情况下系统的相对转子角的稳定时间明显提前,振荡峰值也明显下降.

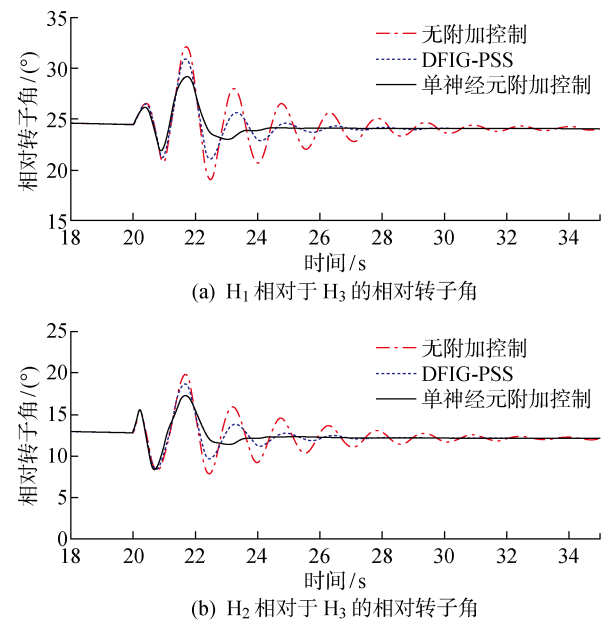


图 6 三相短路故障下两区域相对转子角变化曲线

Fig. 6 Relative rotor angle change curves of two regions under three-phase short circuit fault

图 7 为区域 1 至区域 2 的传输线有功功率的振荡曲线.从图 7 中可以看出,加入单神经元附加控制器之后,传输线功率振幅明显减少,其在故障发生后,继续振荡 3 s 之后趋于稳定,比 DFIG-PSS 控制提前了 2 s,证明了单神经元附加控制器在系统发生三相短路故障时比 DFIG-PSS 附加控制具有更明显的抑制系统低频振荡作用,其在改善系统阻尼特性方面具有更好的鲁棒性.

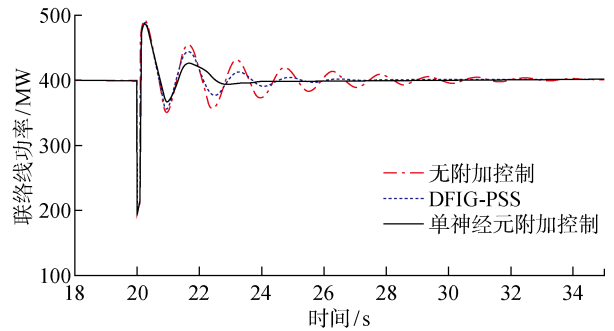


图 7 三相短路故障下联络线有功功率振荡响应曲线

Fig. 7 Tie line active power oscillation response curves under three-phase short circuit fault

图 8 为双馈风电机组有功功率的响应曲线.从图 8 中可以看出,若双馈风电机组没有采用附加装置,当系统发生三相短路故障时,双馈风电机组有功控制环在故障暂态之后并没有发生什么改变,此时系统的低频振荡持续时间较长,而考虑 DFIG-PSS 附加控制和单神经元附加控制策略之后,当系统发生故障后,双馈风电机组的有功控制环均参与了系统的调节,其有功功率随着系统的振荡而发出动态响应,进而起到抑制系统低频振荡的作用,并且单神经元附加控制器具有更明显的改善系统功率的能力.

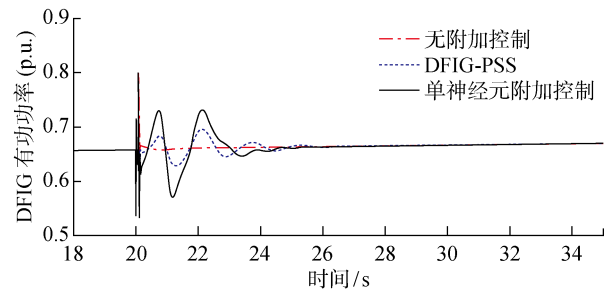


图 8 三相短路故障下双馈风电机组有功功率的响应曲线

Fig. 8 Response curve of active power of DFIG under three-phase short circuit fault

图 9 为三相短路故障下系统同步机转速曲线.从图 9 中也可以看出,单神经元附加控制优越于 DFIG-PSS 附加控制.

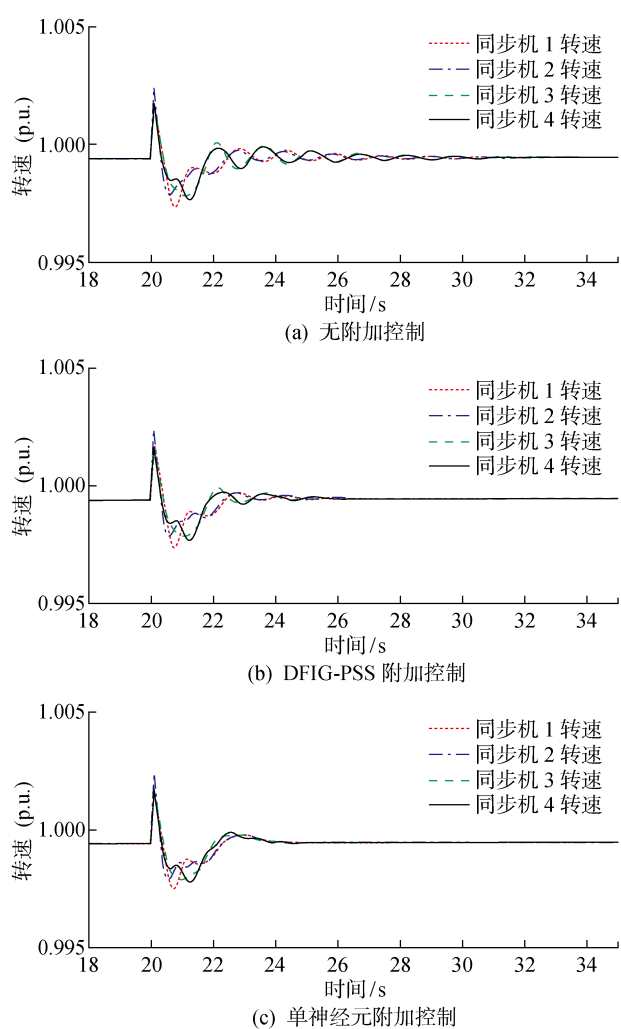


图 9 三相短路故障下转子响应曲线

Fig. 9 Rotor response curves under three-phase short circuit fault

3.3.2 机端扰动情形 为了进一步测试双馈风电机组转子侧有功控制环附加阻尼控制器的有效性,本节利用发电机机端扰动特例为四机两区域电力系统制造系统低频振荡工况.具体实施方案如下:在四机两区域电力系统中,当系统运行至 20 s 时,在同步发电机 2 的励磁参考电压处加入一个 10% 的阶跃响应,使输入值由 1.0 (p. u.) 突降至 0.9 (p. u.),系统运行至 20.6 s 时,扰动源去除,系统恢复正常,观察系统各项变量变化曲线,如图 10 所示.

图 10 为区域 1 同步机相对区域 2 的同步发电机组的相对转子角的响应曲线.从图 10 中可以看出,对于机端扰动,系统采用单神经元附加控制器时,相对转子角相比于无附加阻尼控制器和 DFIG-PSS 附加控制能够更快趋于稳定,振荡峰值明显下降.

图 11 所示为区域 1 至区域 2 的传输线有功功率的振荡曲线.从图 11 中可以看出,机端扰动诱发

低频振荡故障时,加入单神经元附加控制器之后,功率振幅明显减小,出现扰动时,振荡 3 s 之后趋于稳定,比 DFIG-PSS 控制提前了 3 s,证明了单神经元附加控制器在出现机端扰动时具有更明显的抑制系统低频振荡的作用.

图 12 为双馈风电机组有功功率的响应曲线.从

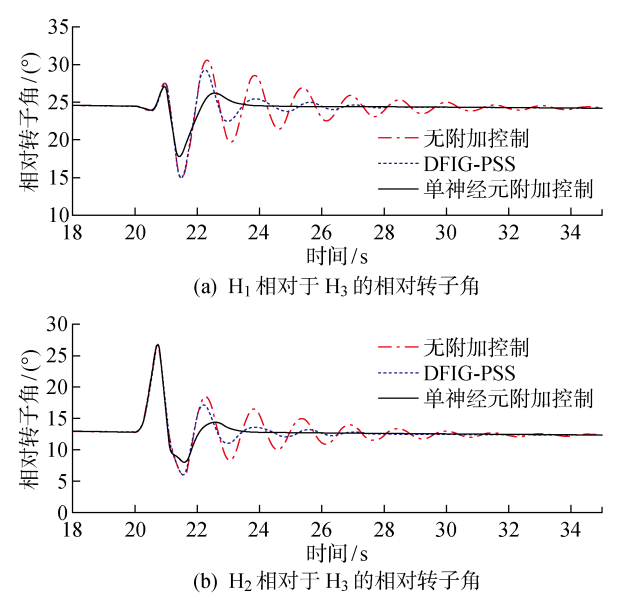


图 10 机端扰动情况下两区域相对转子角变化曲线

Fig. 10 Relative rotor angle change curves of two regions in terminal disturbance

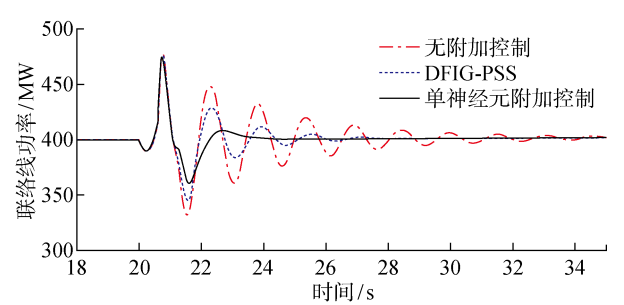


图 11 机端扰动情况下联络线有功功率振荡响应曲线

Fig. 11 Tie line active power oscillation response curves in terminal disturbance

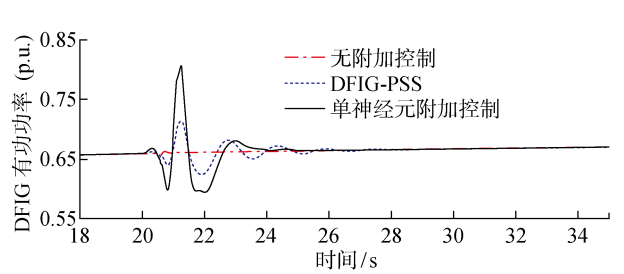


图 12 机端扰动情况下双馈风电机组有功功率响应曲线

Fig. 12 Response curves of active power of DFIG in terminal disturbance

图12中可以看出,考虑单神经元附加控制策略之后,当系统出现机端扰动诱发的低频振荡时,双馈风电机组的有功控制环参与了系统的调节,发出动态响应,进而起到抑制系统低频振荡的作用,并且单神经元附加控制比DFIG-PSS控制具有更明显的改善系统功率的能力。

图13为机端扰动情况下系统同步机转速曲线。由图13可知,机端扰动诱发低频振荡故障发生后,采用本文提出的附加控制时,转子转速虽有振荡但能够更快趋于稳定,控制效果更明显。

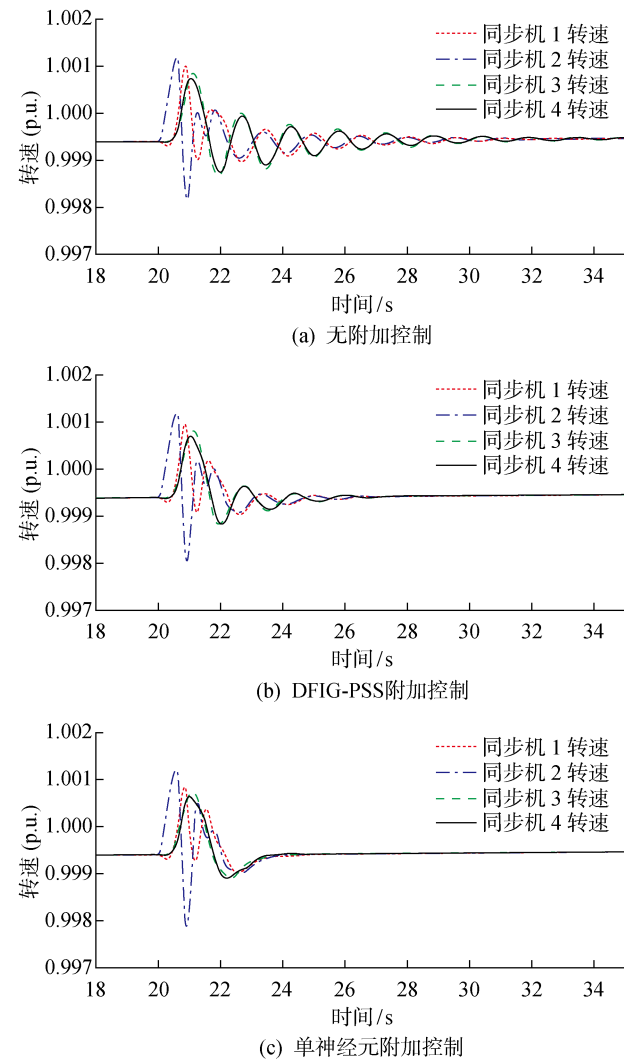


图13 机端扰动情况下转子转速响应曲线

Fig. 13 Rotor response curves in terminal disturbance

从以上仿真效果可以看出,机端扰动系统环境与三相短路故障相似,当系统发生低频振荡故障时,单神经元附加控制器可以使双馈风电机组有功功率控制环快速发出有功功率参与系统振荡调节,并且由于单神经元附加控制器的优越性,其可以使系统更快达到稳定状态。

4 结语

本文围绕双馈风电场的有功调节抑制电力系统频率振荡问题展开研究,在双馈发电机的机侧转速环上引入了以增加电力系统阻尼为目标的单神经元自适应PID附加阻尼控制器。仿真测试与实验结果表明,在电力系统出现频率振荡故障期时,采用本文提出的控制策略可以使风电场快速发出有功功率,以增加系统阻尼,抑制系统出现的频率振荡,并且改进的控制策略不会对风机和系统造成负面影响,具有参考价值。

参考文献:

- [1] 杨蕾,盛师贤,郭成,等. 应用附加阻尼抑制风电接入后电网的低频振荡策略研究[J]. 电工技术, 2020(21): 72-77.
YANG Lei, SHENG Shixian, GUO Cheng, *et al.* Research on low frequency oscillation suppression strategy of grid connected with wind power by additional damping[J]. **Electric Engineering**, 2020(21): 72-77.
- [2] 王鹏,李啸骢,田烨杰,等. 双馈风电机组抑制电力系统低频振荡的非线性控制策略[J]. 电气开关, 2019, 57(6): 14-18.
WANG Peng, LI Xiaocong, TIAN Yejie, *et al.* Nonlinear control strategy for doubly-fed wind turbine to suppress low-frequency oscillation of power systems[J]. **Electric Switchgear**, 2019, 57(6): 14-18.
- [3] MA Y F, LIU J, LIU H H, *et al.* Active-reactive additional damping control of a doubly-fed induction generator based on active disturbance rejection control [J]. **Energies**, 2018, 11(5): 1-18.
- [4] 章艳,张萌,高晗. 基于损耗系数的双馈风机系统阻尼控制研究[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2781-2795.
ZHANG Yan, ZHANG Meng, GAO Han. Damping control for grid connected DFIG system based on dissipated energy coefficient[J]. **Power System Technology**, 2021, 45(7): 2781-2795.
- [5] TANG Z Y, HILL D J, LIU T, *et al.* Distributed inter-area oscillation damping control for power systems by using wind generators and load aggregators [J]. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2020, 123: 106201.
- [6] CAI G W, CHEN X S, SUN Z L, *et al.* A coordinated dual-channel wide area damping control strategy for a doubly-fed induction generator used for sup-

- pressing inter-area oscillation[J]. **Applied Sciences**, 2019, 9(11): 2353.
- [7] 潘峰, 闫庚龙, 苑伟华, 等. 基于双滑模的永磁同步电机直接转矩控制[J]. **电工技术学报**, 2018, 33(Sup. 2): 427-433.
- PAN Feng, YAN Genglong, YUAN Weihua, *et al.* Research on direct torque control for permanent magnet synchronous motor based on the double sliding mode[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2018, 33(Sup. 2): 427-433.
- [8] 倪斌业, 向往, 鲁晓军, 等. 基于状态反馈附加阻尼控制的柔性直流电网抑制低频振荡[J]. **电力自动化设备**, 2019, 39(3): 45-50.
- NI Binye, XIANG Wang, LU Xiaojun, *et al.* Low-frequency oscillation suppression using flexible DC grid based on state feedback supplementary damping control[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2019, 39(3): 45-50.
- [9] LI C S, FANG Y, HE P, *et al.* Additional damping control of a hybrid multi-infeed DC system with a wind farm[J]. **Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)**, 2021, 14(2): 189-197.
- [10] DENG W, PEI W, XIAO H, *et al.* Research on stability margin enhancement for low-voltage multi-terminal DC system based on additional damping control[J]. **IET Generation, Transmission & Distribution**, 2019, 13(15): 3464-3475.
- [11] YANG L, GAO J Y, MA Z, *et al.* Analysis on the influence of wind power participating in frequency modulation on low-frequency oscillation in Yunnan power grid[J]. **Journal of Physics: Conference Series**, 2021, 1748: 052030.
- [12] 艾松波, 唐欣, 王红亚. 光伏电站附加阻尼控制器及控制参数优化设计[J]. **电力科学与技术学报**, 2020, 35(6): 21-27.
- AI Songbo, TANG Xin, WANG Hongya. Optimal design of additional damping controller and control parameters for photovoltaic power station[J]. **Journal of Electric Power Science and Technology**, 2020, 35(6): 21-27.
- [13] GUPTA A K, VERMA K, NIAZI K R. Robust coordinated control for damping low frequency oscillations in high wind penetration power system[J]. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, 2019, 29(5): 12006.
- [14] 杨蕾, 甘维公, 李胜男, 等. DFIG 风电机组协同 SVG 抑制电网低频振荡方法[J]. **中国电力**, 2020, 53(11): 175-184.
- YANG Lei, GAN Weigong, LI Shengnan, *et al.* Method of DFIG cooperating with SVG to suppress low-frequency oscillation in power systems[J]. **Electric Power**, 2020, 53(11): 175-184.
- [15] 陈祥松. 高比例双馈风电并网电力系统机电振荡阻尼控制策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020.
- CHEN Xiangsong. Research on control strategy of doubly-fed induction generator to suppress electromechanical oscillation of power system [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2020.
- [16] BHUKYA J, MAHAJAN V. Mathematical modeling and stability analysis of PSS for damping LFOs of wind power system[J]. **IET Renewable Power Generation**, 2019, 13(1): 103-115.
- [17] ZHANG Y, ZHANG M, GAO H. A fuzzy control strategy for grid connected DFIG system based on dissipated energy coefficient [C] // **2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration**. Wuhan, China: IEEE, 2020: 530-536.
- [18] 荣飞, 李培瑶, 周诗嘉. 双馈风电场损耗最小化的有功无功协调优化控制[J]. **电工技术学报**, 2020, 35(3): 520-529.
- RONG Fei, LI Peiyao, ZHOU Shijia. Coordinated optimal control with loss minimization for active and reactive power of doubly fed induction generator-based wind farm[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2020, 35(3): 520-529.
- [19] 陈卓, 郝正航, 秦水介. 风电场阻尼电力系统振荡的机理及时滞影响[J]. **电力系统自动化**, 2013, 37(23): 8-14.
- CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, QIN Shuijie. Mechanism of wind farm damping power system oscillation and time-delay influence[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2013, 37(23): 8-14.
- [20] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 [M]. 第 2 版 北京: 电子工业出版社, 2004.
- LIU Jinkun. Advanced PID control MATLAB simulation [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

(本文编辑:石易文)