

基于扰动跟踪 Terminal 滑模与多目标零动态的 协调励磁控制器设计

栾某德^{1,2}, 陆巍¹, 刘涤尘², 廖清芬², 赵常威^{1,2}, 冯玉¹

(1. 安徽省电力科学研究院, 安徽 合肥 230601; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对电力系统中存在各种扰动和模型不确定性等, 为了提高励磁控制的鲁棒性, 并考虑机端电压限制, 设计了以功角稳定和电压控制为目标的协调励磁控制器。功角稳定控制在 Terminal 滑模中在线跟踪扰动并进行补偿, 构成扰动跟踪 Terminal 滑模控制, 抑制一般扰动和振荡, 并能抑制共振型低频振荡; 同时设计了多目标零动态滑模控制, 在机端电压过限或突变时投入, 具有控制功角和提高机端电压性能的功能。稳定控制和电压控制协调切换完成励磁控制。仿真结果表明控制器能在各种扰动时快速稳定功角, 并能抑制共振型低频振荡, 同时能有效控制机端电压。

关键词: 状态反馈精确线性化; 周期性扰动; 共振型低频振荡; 扰动跟踪; Terminal 滑模; 机端电压; 多目标

Coordination excitation controller design based on disturbance tracking Terminal sliding mode and multi-objective zero dynamics control

LUAN Moude^{1,2}, LU Wei¹, LIU Dichen², LIAO Qingfen², ZHAO Changwei^{1,2}, FENG Yu¹

(1. Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China; 2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Considering various disturbances and model uncertainty in power system, a coordination excitation controller for power angle stability and terminal voltage control is designed to enhance the robustness of excitation control and take terminal voltage limit into account. Power angle stability control tracks disturbance and compensate it in Terminal sliding mode and it makes disturbance tracking Terminal sliding mode excitation control. It's able to suppress general disturbances, oscillations, and also resonance-type low-frequency oscillation. Meanwhile multi-objective zero dynamics sliding mode control is designed. It will be put to use when terminal voltage exceeds the limits or voltage jump occurs and it's able to control power angle stability and improve terminal voltage property. The excitation controller operates through coordination switch of stability control and voltage control. Simulation shows that the controller is able to provide strong damping and stabilize power angle fast during disturbances, to suppress resonance-type low-frequency oscillation, as well as to control generator terminal voltage effectively.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A119) and National Natural Science Foundation of China (No. 51077103).

Key words: state feedback exact linearization; periodic disturbance; resonance-type low-frequency oscillation; disturbance tracking; Terminal sliding mode; generator terminal voltage; multi-objective

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0126-10

0 引言

随着特高压电网建设, 互联特大电网的建成, 频振荡等动态稳定问题愈加突出, 已成为大电网互

联稳定性和区域电网功率互送的拦路虎^[1-3]。利用发电机励磁控制增大阻尼是进行动态稳定控制、机端电压控制等的有效手段, 也能有效控制低频振荡。励磁控制现已发展到非线性多变量控制, 主要有映射线性化法^[3]、基于能量的直接控制法(如 Hamilton 能量、Lyapunov 法^[4])、滑模控制^[5-7]、鲁棒控制、自适应控制和智能控制等, 但这些方法或能量函数

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A119); 国家自然科学基金项目(51077103)

构造不易, 或依赖准确数学模型, 或对不确定性、扰动的鲁棒性不够强等。近年来的滑动模态控制由于响应快、实现简单、对模型不确定性和外部扰动有较好的鲁棒性, 因而在励磁控制中研究较多^[5-7], 而 Terminal 滑模在滑模面引入了非线性函数, 使误差能在有限时间收敛, 因而比一般滑模更好。然而对于电力系统持续的输入扰动, 包括滑模控制在内的鲁棒控制方法都较难抑制。近来发现系统会存在持续的接近系统固有振荡频率的周期性小扰动^[8-12], 如原动机输出机械功率周期性小扰动、励磁输入的周期性小扰动、负荷的周期性小扰动等, 这会引发系统大幅度的共振型低频振荡, 需进行有效的控制。一般非线性控制主要考虑功角稳定, 忽略了电压控制而致大扰动下机端电压特性不好, 不能满足电压调节精度要求, 且机端电压过高或过低都可能引起发电机保护误动作。文献[13]提出多重控制和零动态控制进行稳定控制和电压控制, 但控制项需机端电压 d 、 q 轴分量, 且电压限制控制是让电压稳定在高值或低值。文献[14]仅是将电压和功角控制之和作为输入, 控制机理及相互影响未知。文献[15-16]综合功角、电压等控制目标, 但参数选择不当会效果差甚至使系统失稳, 需复杂的极点配置计算。

模糊系统能以任意精度逼近高阶非线性系统^[17], 因此可以利用一种模糊扰动观测器对系统的综合扰动(包括励磁扰动、原动机扰动和负荷扰动等扰动和模型不确定性)在线追踪并补偿。本文在单机无穷大系统状态反馈精确线性化基础上, 采用无奇异的递归 Terminal 滑模励磁设计, 运用模糊扰动观测器在线追踪系统综合扰动并进行抵消, 设计出带扰动跟踪的 Terminal 滑模励磁控制既在扰动下具有良好的鲁棒性, 又能有效抑制共振型低频振荡。同时为改善大扰动下的机端电压特性, 选择功角、功率和机端电压作为控制目标, 再进行多目标零动态滑模励磁控制设计, 使系统电压稳定性和功角稳定性都较好。扰动跟踪 Terminal 滑模控制和多目标零动态滑模控制两者进行协调切换控制构成扰动跟踪 Terminal 滑模和多目标零动态协调励磁控制(disturbance tracking Terminal sliding mode and multi-objective Zero dynamics coordination excitation control, DTSMC-MOZD), 分别以稳定控制和兼顾机端电压限制的多目标稳定控制为主。一般情况下 DTSMC 投入; 但当发生大扰动致机端电压超过限制时, 切换为投入 MOZD, 当电压回到符合要求范围内时, 再切换回 DTSMC 投入。这样既能提供强阻尼, 抑制了一般扰动、振荡和共振型低频振荡, 又能在机端电压越限时使电压和功角都有很好的控制性能。

1 扰动跟踪 Terminal 滑模抑制一般振荡及共振型低频振荡设计

1.1 基于微分几何的状态反馈精确线性化设计

本文采用典型单机无穷大系统进行励磁控制器的设计与验证, 发电机采用常用的三阶模型^[16], 经过变压器和两回输电线路向无穷大系统供电。

具有励磁控制的三阶发电机数学模型为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \Delta\omega\omega_0 \\ \Delta\dot{\omega} = \frac{1}{H}(P_m - P_e - D\Delta\omega) \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}}(-E_q + E_{fds} + u) \end{cases} \quad (1)$$

令 $\mathbf{x} = [\delta, \Delta\omega, E'_q]$, 为系统的状态向量;

$\mathbf{y} = [E_q, U_t, P_e]$, 为系统的约束向量, 并满足约束条件 $\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0$ 。

$$\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{bmatrix} E_q - E'_q \frac{X'_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} - (1 - \frac{X'_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}})V_s \cos \delta \\ U_t^2 - (\frac{x_q V_s \sin \delta}{x_{q\Sigma}})^2 - (\frac{x_d V_s \cos \delta}{x_{d\Sigma}})^2 \\ P_e - \frac{E'_q V_s}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{V_s^2}{2} \frac{X'_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

式中: ω_r 为角速度偏差, $\omega_r = \omega - 1$, ω 为实际角速度的标幺值; H 为发电机等值时间常数, 单位为秒; P_e 为发电机输出电磁功率; D 为发电机的机械阻尼系数; E_q 为发电机控制励磁电势; E'_q 为暂态电抗后电势; x_d 、 x_q 分别为 d 轴和 q 轴同步电抗, x'_d 为 d 轴暂态电抗; E_{fds} 为发电机励磁绕组的基准励磁值; V_s 为无穷大系统的母线电压; δ 为发电机暂态电抗后电势 E'_q 与 V_s 之间的夹角; $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_T + x_L$, $x_{q\Sigma} = x_q + x_T + x_L$, $x_{d\Sigma} = x_d + x_T + x_L$, x_T 为变压器电抗, x_L 为线路总电抗; u 为发电机励磁偏差量, 为励磁控制量。

考虑到原动机输入扰动, 励磁输入扰动和系统数学模型和参数中的不确定项, 将式(1)的三阶电力系统模型写成仿射非线性形式, 可以得出:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \Delta\mathbf{f} + \mathbf{g}(\mathbf{x})u + \mathbf{g}_1(\mathbf{x})w_1 + \mathbf{g}_2(\mathbf{x})w_2$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \Delta\omega\omega_0 \\ \frac{1}{H}(P_m - P_e - D\Delta\omega) \\ \frac{1}{T'_{d0}}(E_{fds} - E_q) \end{bmatrix}, \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T'_{d0}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}_1(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ H \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{g}_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{T_{d0}} \end{bmatrix}, \Delta \mathbf{f} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta f_2 \\ \Delta f_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\Delta \mathbf{f}$ 为考虑模型参数不确定性和建模误差而引入的量; w_1 、 w_2 分别为发电机原动机输入扰动、负荷扰动和励磁输入扰动; u 为励磁控制项。

对于式(3)所示的三阶电力系统模型, 根据非线性控制的微分几何理论, 进行精确反馈线性化^[3], 选择输出观测函数为 $h(x) = \delta - \delta_0$, 由于 $L_{g_1} L_f h(x) \neq 0$, 将 w_1 、 w_2 也看成是系统的输入项时, 该多输入系统的关系度 $r=2$, 输入扰动 w_1 、 w_2 对系统的影响无法消除, 不能采用传统的微分同胚映射 $z_i = L_f^{-1} h(x) (i=1, 2, \dots, n-1)$ 来变换系统, 需对映射关系进行改进, 因此本文选用如式(4)的微分同胚映射。

$$\begin{cases} z_1 = h(x) = \delta - \delta_0 = \Delta \delta \\ z_2 = \dot{z}_1 = L_f h(x) + L_{g_1} h(x) w_1 + L_{g_2} h(x) w_2 + L_g h(x) u = L_f h(x) = \Delta \omega \omega_0 \\ z_3 = \dot{z}_2 = L_{f+\Delta f}^2 h(x) + L_g L_f h(x) u + L_{g_1} L_f h(x) w_1 + L_{g_2} L_f h(x) w_2 = L_f^2 h(x) + L_{g_1} L_f h(x) w_1 + L_{M_f} L_f h(x) = \Delta \dot{\omega} \omega_0 \end{cases} \quad (4)$$

利用该微分同胚的映射关系, 便可以得到系统等价线性化标准模型为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = \frac{\partial L_f^2 h(x)}{\partial x} \cdot \dot{x} = L_f^3 h(x) + L_g L_f^2 h(x) u + L_{g_1} L_f^2 h(x) w_1 + L_{g_2} L_f^2 h(x) w_2 + L_{M_f} L_f^2 h(x) + (L_{M_f} L_f h(x))' + (L_{g_1} L_f h(x) w_1)' = \alpha(x) + \beta(x) u + \Omega_x(x, w, u) = v \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\alpha(x) = L_f^3 h(x)$, $\beta(x) = L_g L_f^2 h(x)$; $\Omega_x(x, w, u) = L_{g_1} L_f^2 h(x) w_1 + L_{g_2} L_f^2 h(x) w_2 + L_{M_f} L_f^2 h(x) + (L_{M_f} L_f h(x))' + (L_{g_1} L_f h(x) w_1)'$, $\Omega_x(x, w, u)$ 为综合扰动。

这样原系统变成以虚拟量 v 为输入的标准型, 并能将所有的不确定项和扰动项通过微分变换都变换至等效的线性化系统最后一项中, 突破了非线性微分理论中对系统关系度的限制条件, 扩大了非线性控制法在电力系统中的应用范围。

1.2 利用模糊系统设计扰动观测器

研究发现, 模糊系统是万能逼近器, 能以任意精度逼近紧集上的任意函数^[17]。本文采用模糊系统来设计模糊扰动观测器^[18](Fuzzy disturbance observer, FDO)对电力系统发电机的扰动和模型参数不确定性的综合扰动(非线性函数)在线追踪, 并用模糊系统和跟踪误差来替代未知的综合扰动, 设计控制规律抵消扰动达到抑制振荡的目的。

基本的模糊逻辑系统有模糊规则库, 模糊推理机, 模糊器和解模糊器四个组成部分。模糊推理机使用模糊的 IF-THEN 规则组合成一个输入语言变量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$ 到输出语言变量 $y \in R$ 的映射, 第 k 条模糊规则如下:

$$R^k: \text{If } x_1 \text{ is } A_1^k \text{ and } \dots x_n \text{ is } A_n^k, \text{ then } y \text{ is } y^k \quad (6)$$

式中, $A_1^k, A_2^k, \dots, A_n^k$ 和 y^k 是模糊集合。使用含 r 条模糊规则、乘积推理机, 单值模糊器和中心平均解模糊器的模糊系统可以表示为

$$y(x) = \frac{\sum_{k=1}^r y^k \left(\prod_{l=1}^n \mu_{A_l^k}(x_l) \right)}{\sum_{k=1}^r \left(\prod_{l=1}^n \mu_{A_l^k}(x_l) \right)} = \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \boldsymbol{\xi}(x) \quad (7)$$

式中: r 为模糊规则数; $\mu_{A_l^k}(x_l)$ 是模糊变量 x_l 的隶属度函数值; $\hat{\boldsymbol{\theta}}^T = (y^1, y^2, \dots, y^r)$ 为各个模糊集的中心, 是可以调节的参数向量。 $\boldsymbol{\xi}^T = (\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^r)$ 是模糊基函数, 其中

$$\xi^k = \frac{\prod_{l=1}^n \mu_{A_l^k}(x_l)}{\sum_{k=1}^r \left(\prod_{l=1}^n \mu_{A_l^k}(x_l) \right)}$$

对于式(5)所示的 3 阶非线性系统, 控制任务是设计控制规律使 z_1, z_2, z_3 各变量在有限时间内收敛至 0。利用模糊系统对非线性函数的任意精度逼近, 本文设计了一种模糊扰动观测器 $\hat{\Omega}_x(x, w, u | \hat{\boldsymbol{\theta}})$ 追踪未知的综合扰动 $\Omega_x(x, w, u)$, 并依此在控制中进行扰动跟踪, 抑制振荡并稳定系统。

如果变量 x 属于紧集 M_x , 最优参数向量 $\boldsymbol{\theta}^*$ 定义为

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta} \in M_\theta} \left[\sup_{x \in M_x} \left| \Omega_x(x, w, u) - \hat{\Omega}_x(x, w, u | \hat{\boldsymbol{\theta}}) \right| \right] \quad (8)$$

即参数向量 $\boldsymbol{\theta}^*$ 所对应的模糊系统是对 $\Omega_x(x, w, u)$ 的最接近逼近。其中 $\boldsymbol{\theta}^*$ 满足条件 $M_\theta = \{ \boldsymbol{\theta} | \|\boldsymbol{\theta}\| \leq m_\theta \}$, m_θ 是设计参数。

由于在系统等效模型中包含综合扰动项的微分方程为

$$\dot{z}_3 = \alpha(x) + \beta(x) u + \Omega(x, w, u) \quad (9)$$

我们使用如下的动态追踪系统:

$$\dot{\mu} = -\sigma\mu + p(x, w, u, \hat{\theta}) \quad (10)$$

式中, $p(x, w, u, \hat{\theta}) = \sigma x_n + \alpha(x) + \beta(x)u + \hat{\Omega}_x(x, w, u | \hat{\theta})$ 。定义扰动观测误差 $\zeta = x_n - \mu$, 按式(11)进行参数调节。

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma \zeta \xi(x, u) \quad (11)$$

若其有界, 则扰动观测误差最终一致有界。

$\zeta \rightarrow 0$ 同时也能保证模糊系统 $\hat{\Omega}_x(x, w, u | \hat{\theta})$ 对实际的未知扰动 $\Omega(x, w, u)$ 的有效追踪。同时为了保证 FDO 在系统 $\Omega(x, \theta, u)$ 能有零输出, 因此设置 $\hat{\theta}(0) = 0$ 。在参数调节过程中, 为了保证 $\|\hat{\theta}\|$ 的有界性, 采用如式(12)的投影算法限制参数调节。

$$\dot{\hat{\theta}} = P[\gamma \zeta \xi(x, u)] = \gamma \zeta \xi(x, u) - I_\theta \gamma \frac{\zeta \hat{\theta}^\top \xi(x, u) \hat{\theta}}{\|\hat{\theta}\|^2} \hat{\theta} \quad (12)$$

式中,

$$I_\theta = \begin{cases} 0, & \text{if } \|\hat{\theta}\| < M_\theta, \text{ or } \|\hat{\theta}\| = M_\theta \text{ and } \zeta \hat{\theta}^\top \xi(x, u) \leq 0 \\ 1, & \text{if } \|\hat{\theta}\| = M_\theta \text{ and } \zeta \hat{\theta}^\top \xi(x, u) > 0 \end{cases}.$$

根据模糊系统和模糊控制性质, 可以通过增加模糊规则的数目来提高模糊扰动观测器对综合扰动的逼近精度, 因此有很强的非线性适应性。

1.3 带扰动跟踪的输入有界 Terminal 滑模控制

一般的滑模变结构控制是设计线性滑动模态面使状态进入滑模面, 滑模面上也保持运动的稳定性, 通过合适的滑模面的设计来控制系统趋近和收敛于平衡点, 但是仅为渐进收敛, 收敛时间无法控制。Terminal 滑模在滑动模态中加入了非线性函数, 利用非线性函数的衰减能力使得状态的跟踪误差能在有限时间内达到零, 比一般的滑模控制的渐近趋于平衡点有收敛时间的保证, 控制的收敛性能优于一般的普通滑模。终端滑模利用连续的非线性切换函数取代线性切换函数构造滑模面, 没有线性滑模的抖振的弊端。

传统的 Terminal 滑模面为

$$s = \dot{x} + \beta x^{q/p} = 0 \quad (13)$$

式中: $x \in R$ 为状态变量; $\beta > 0$, $p, q(p > q)$ 为正奇数。据文献[20]得系统从任意初始状态 $x(0) \neq 0$ 沿滑模面式(13)到达平衡状态 $x=0$ 的时间为

$$t_s = \frac{P}{\beta(p-q)} |x(0)|^{(p-q)/p} \quad (14)$$

以 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2} x^2$ 来进行阐释, V 在式(13)规律下的时间导数为

$$\dot{V} = x\dot{x} = -\beta x x^{q/p} = -\beta x^{(p+q)/p} \quad (15)$$

其中, $p+q$ 为偶数, 故 \dot{V} 负定。非线性项 $\beta x^{q/p}$ 的存在使系统的收敛特性大大提高。收敛速度在离平衡点近时会更大因而能够在有限的时间就进入平衡点。由于式(13)在接近平衡点时收敛速度比线性滑动模态($p=q$)的慢, 所以尽管其向平衡点收敛很快, 但是总的收敛时间不一定最短。因而出现了全局快速 Terminal 滑动模态控制。其形式为

$$s = \dot{x} + \alpha x + \beta x^{q/p} = 0 \quad (16)$$

式中: $x \in R$ 为状态量; $\alpha, \beta > 0, p, q(p > q)$ 为正奇数。

由式(16), 有

$$\dot{x} = -\alpha x - \beta x^{q/p} \quad (17)$$

可以解释为: 状态 x 距零点很远时, 收敛时间主要由式 $\dot{x} = -\beta x^{q/p}$ 决定, x 呈指数快速衰减; 当状态 x 接近平衡点时, 收敛时间主要由 $\dot{x} = -\alpha x$ 决定。故全局终端滑模兼有线性滑模和终端滑模的优点, 快速收敛的同时又能保证有限时间内进入到平衡状态, 对扰动和参数不定性具有强鲁棒性。

对一般的形如式(18)的仿射非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} \\ \dot{x}_n = f(x) + g(x)u \end{cases} \quad (18)$$

设计递归结构的快速 Terminal 滑模如下

$$\begin{aligned} s_1 &= \dot{s}_0 + \alpha_0 s_0 + \beta_0 s_0^{q_0/p_0} \\ s_2 &= \dot{s}_1 + \alpha_1 s_1 + \beta_1 s_1^{q_1/p_1} \\ &\vdots \\ s_{n-1} &= \dot{s}_{n-2} + \alpha_{n-2} s_{n-2} + \beta_{n-2} s_{n-2}^{q_{n-2}/p_{n-2}} \end{aligned} \quad (19)$$

其中: $\alpha_i, \beta_i > 0; q_i, p_i (q_i < p_i) (i=0, 1, \dots, n-2)$ 为正奇数。

对式(19)所示系统, 取全局快速 Terminal 滑模控制律如下

$$u(t) = -\frac{1}{\beta(x)} \left[\alpha(x) + \sum_{k=0}^{n-2} \alpha_k s_k^{(n-k-1)} + \sum_{k=0}^{n-2} \beta_k \frac{d^{n-k-1}}{dt^{n-k-1}} s_k^{q_k/p_k} + k \cdot s_{n-1} + \gamma s_{n-1}^{q/p} \right] \quad (20)$$

其中, $s_0 = x_1$ 。

而对于仿射非线性系统模型, 最后一项中含有综合扰动项的系统式(5), 我们设计扰动跟踪 Terminal 滑模控制律为

$$u_1 = u(t) = -\frac{1}{\beta(x)}[\alpha(x) + \hat{\Omega}_x(x, w, u|\hat{\theta}) + \sum_{k=0}^{n-2} \alpha_k s_k^{(n-k-1)} + \sum_{k=0}^{n-2} \beta_k \frac{d^{n-k-1}}{dt^{n-k-1}} s_k^{q_k/p_k} + k \cdot s_{n-1} + \gamma s_{n-1}^{q/p}] \quad (21)$$

定理 1^[20]: 如果存在连续函数 $v(t)$, 且满足微分不等式

$$\dot{v}(t) \leq -\alpha v(t) - \beta v^{q/p}(t) \quad \forall t \geq 0 \quad (22)$$

a, b 为正数, p, q 同式(13)。则 $v(t)$ 将在有限时间 t_f 内收敛到零。

$$t_f = \frac{p}{\alpha(p-q)} \ln \frac{\alpha v(0)^{(p-q)/p} + \beta}{\beta} \quad (23)$$

结合式(19), 对 \dot{s}_{n-1} 通过递推, 得

$$\dot{s}_{n-1} = s_0^{(n)} + \sum_{k=0}^{n-2} \alpha_k s_k^{(n-k-1)} + \sum_{k=0}^{n-2} \beta_k \frac{d^{n-k-1}}{dt^{n-k-1}} s_k^{q_k/p_k} = \quad (24)$$

$$\dot{x}_n + \sum_{k=0}^{n-2} \alpha_k s_k^{(n-k-1)} + \sum_{k=0}^{n-2} \beta_k \frac{d^{n-k-1}}{dt^{n-k-1}} s_k^{q_k/p_k}$$

所以有

$$\dot{s}_{n-1} = \alpha(x) + \beta(x)u + \Omega_x(x, w, u) + \sum_{k=0}^{n-2} \alpha_k s_k^{(n-k-1)} + \sum_{k=0}^{n-2} \beta_k \frac{d^{n-k-1}}{dt^{n-k-1}} s_k^{q_k/p_k} \quad (25)$$

考虑到 FDO 中的最优参数向量 θ^* , $\Omega_x(x, w, u)$

可由模糊系统 $\hat{\Omega}_x(x, w, u|\theta^*)$ 和重构误差 $\varepsilon(x, w, u)$ 之和表示:

$$\Omega_x(x, w, u) = \hat{\Omega}_x(x, w, u|\theta^*) + \varepsilon(x, w, u) \quad (26)$$

$$|\varepsilon(x, w, u)| \leq \bar{\varepsilon}$$

上限 $\bar{\varepsilon}$ 能通过增加模糊规则数目任意减小。

将控制律式(21)代入式(25), 得

$$\dot{s}_{n-1} = -k \cdot s_{n-1} - \gamma s_{n-1}^{q/p} + \tilde{\theta}^T \xi(x, u) + \varepsilon(x, w, u) = \tilde{f}(x) - k \cdot s_{n-1} - \gamma s_{n-1}^{q/p} \quad (27)$$

其中: $\tilde{\theta} = \theta^* - \hat{\theta}$; $\tilde{f}(x) = \tilde{\theta}^T \xi(x, u) + \varepsilon(x, w, u)$ 。

选择如下 Lyapunov 函数来分析控制下的稳定性情况:

$$V = \frac{1}{2} s_{n-1}^2 \geq 0 \quad (28)$$

V 的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s_{n-1} \dot{s}_{n-1} = s_{n-1} \tilde{f}(x) - k \cdot s_{n-1}^2 - \gamma s_{n-1}^{(q+p)/p} = \\ &= -k \cdot s_{n-1}^2 - (\gamma - \frac{\tilde{f}(x)}{s_{n-1}^{q/p}}) s_{n-1}^{(q+p)/p} \leq \\ &= -2 - 2^\varphi (\gamma - \frac{\tilde{f}(x)}{s_{n-1}^{q/p}}) V^\varphi \end{aligned} \quad (29)$$

式中, $0 < \varphi = (q+p)/(2p) < 1$, 选择合适参数使满足

$$\gamma - \frac{\tilde{f}(x)}{s_{n-1}^{q/p}} \geq \gamma' > 0 \quad (30)$$

则有 $\dot{V} \leq -2 - 2^\varphi \gamma' V^\varphi \leq 0$, 据定理 1, V 将在有限时间收敛到零, s_{n-1} 将在有限时间内收敛到小区域 Δ 内, 所以该控制下系统是稳定的且有限时间收敛。

$$\Delta = \left\{ s_{n-1} \mid |s_{n-1}| \leq \left(\frac{|\tilde{\theta}^T \xi(x, u) + \varepsilon(x, w, u)|}{(\gamma - \gamma')} \right)^{p/q} \right\} \quad (31)$$

Terminal 滑模中的参数 q_k, p_k 必须通过恰当的选择才能避免奇异问题^[21], 这是因为在控制项 $\frac{d^{n-k-1}}{dt^{n-k-1}} s_k^{q_k/p_k}$ 包含了可能含有负数次幂的因子, 这就导致当 $s_{n-1} \rightarrow 0, u \rightarrow \infty$ 的情况发生。这种奇异情况可以通过定理 2 的参数选取约束来避免。

定理 2^[21]: 如果 $\frac{q_k}{p_k} > \frac{n-k-1}{n-k}$, 就可以保证当

k 取从 $n-2$ 到 0 的值时, 依次有 $s_k \rightarrow 0$ 时, u 是有界的。

2 多目标滑模零动态提高机端电压特性

DTTSMC 以功角稳定为主要控制目标, 能够抑制振荡, 但是电力系统发生大扰动时, 在功角稳定下机端电压有可能超出要求的范围。而零动态控制仅要求对状态方程部分线性化, 因此对关系度 r 小于模型阶数 n 的输出信号, 具有很高的可研究性, 为实现多目标控制提供了方法。零动态^[3] 将系统的动态行为分为外部动态和内部动态两部分, 针对我们关心的外部动态进行控制设计使其有优良品质, 内部动态要求其稳定即可。

对于电力系统模型(1), 为取得良好的功角特性、机端电压特性, 实现多目标控制, 本文选择影响电能质量和发电机性能的机端电压和发电机转速, 以及决定不平衡转矩的输出功率偏差作为输出信号, 进行多目标零动态控制, 取输出函数为

$$z_1 = h(x) = c_1 \Delta U_t + c_2 \Delta \omega \cdot \omega_0 + c_3 \Delta P_e \quad (32)$$

式中: $\Delta U_t = U_t - U_{ref}, \Delta P_e = P_e - P_{e0}$; U_{ref} 为机端电

压参考值, P_{e0} 为平衡点处的电磁功率值。

对系统(1), 进行零动态系统推导如下:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \left[\frac{\partial h(x)}{\partial x} + \frac{\partial h(x)}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \right] \cdot \dot{x} = \\ &= \left[\frac{\partial h(x)}{\partial x} - \frac{\partial h(x)}{\partial y} \cdot \left(\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} \right] \cdot \dot{x} = \\ &= \alpha'(x, z_1) + \beta'(x, z_1) \cdot u \end{aligned} \quad (33)$$

式中

$$\begin{aligned} \alpha'(x, z_1) &= c_{13} \cdot \frac{1}{H} \cdot (P_m - P_e - D\Delta\omega) + c_{23} \cdot \frac{V_s \cdot \sin \delta}{x_{d\Sigma}} \cdot \\ &= \frac{1}{T'_{d0}} (E_{fdS} - E_q) + c_{23} \cdot \left(\frac{E'_q V_s}{X'_{d\Sigma}} \cos \delta + \right. \\ &= V_s^2 \frac{X'_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X'_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \cos 2\delta \cdot \Delta\omega \cdot \omega_0 + c_{22} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \\ &= \frac{x_s (x_s E'_q + x'_d V_s \cos \delta)}{x_{d\Sigma}^2} \cdot \frac{1}{T'_{d0}} (E_{fdS} - E_q) - c_{22} \cdot \\ &= \frac{1}{2U_t} \left[\left(\frac{x'_d V_s^2}{x_{d\Sigma}^2} - \frac{x_q^2 V_s^2}{x_{q\Sigma}^2} \right) \sin 2\delta + \frac{2x_s x'_d V_s \sin \delta \cdot E'_q}{x_{d\Sigma}^2} \right] \cdot \\ &= \Delta\omega \cdot \omega_0 \\ \beta'(x, z_1) &= c_{22} \cdot \frac{1}{U_t} \cdot \frac{x_s (x_s E'_q + x'_d V_s \cos \delta)}{T'_{d0} \cdot x_{d\Sigma}^2} + \\ &= c_{23} \cdot \frac{V_s \cdot \sin \delta}{T'_{d0} \cdot x_{d\Sigma}} \cdot \frac{1}{T'_{d0}} \end{aligned} \quad (34)$$

由于 $\beta'(x, z_1)$ 不等于 0, 故系统相对阶为 1。故原系统可通过一部分反馈线性化为 Byrnes-Isidori 规范型:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \alpha'(x, z_1) + \beta'(x, z_1) \cdot u \\ \dot{\delta} = \Delta\omega\omega_0 \\ \Delta\dot{\omega} = \frac{1}{H} (P_m - P_e - D\Delta\omega) \\ s = z_1 = h(x) = c_1 \Delta U_t + c_2 \Delta\omega \cdot \omega_0 + c_3 \Delta P_e \end{cases} \quad (35)$$

若直接根据外部动态为 0, 令输出和输出导数为 0 进行零动态控制, 会由于模型误差和外部扰动的存在, 以及失能和限幅等因素影响, 这种控制难以实现对输出的有效控制。故本文选用具有较强鲁棒性的线性滑模变结构控制来设计零动态, 使其增强抑制扰动等的影响, 提高控制效果。

本文令滑模面 $S = z_1 = h(x) = c_1 \Delta U_t + c_2 \Delta\omega \cdot \omega_0 + c_3 \Delta P_e$, 由 S 求导, 我们得到 $\dot{s} = \dot{z}_1 = \alpha'(x, z_1) + \beta'(x, z_1) \cdot u$ 。

采用规定趋近率的方法来改善系统运动点趋近切换面时的动态品质, 本文取指数趋近率

$$\dot{S} = -\varepsilon \operatorname{sgn} S - kS \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (36)$$

sgn 是符号函数。则有 $s \cdot \dot{s} = -\varepsilon \cdot s \cdot \operatorname{sgn} s - ks^2 < 0$, 因此用滑模变结构控制能使外部动态 z_1 趋近于零。

可以解出如下的滑模控制量

$$u_2 = u = \frac{-1}{\beta'(x, z_1)} [\alpha'(x, z_1) + \varepsilon \operatorname{sgn} S + kS] \quad (37)$$

由于符号函数可能引起抖振, 因此将符号函数换成具有连续性特性的饱和函数 sat , 因此有

$$u_2 = u = \frac{-1}{\beta'(x, z_1)} [\alpha'(x, z_1) + \varepsilon \operatorname{sat} S + kS] \quad (38)$$

其中, $\operatorname{sat}(S) = \begin{cases} \frac{S}{\delta}, & |S| < \delta \\ \operatorname{sgn}(S), & |S| > \delta \end{cases}$, δ 为充分小的正数。

由于输出函数包含了机端电压偏差、转速偏差和电磁功率偏差, 因此输出趋于零保证了这些偏差量都趋于零, 实现了多控制目标为零的控制。

3 稳定控制与多目标控制的协调切换控制

本文设计发电机励磁切换控制器, 以功角稳定为主的 DTSMC 和兼顾机端电压和稳定控制的 MOZD 协调切换作用, 各司其责。

利用监测设备实时监测发电机机端电压, 正常运行、一般故障和扰动以及存在持续性扰动, 并且机端电压在要求的范围内时, 以稳定控制为主, 投入 DTSMC, 能抑制一般扰动、振荡和共振型低频振荡, 鲁棒性较强。当大扰动等导致发电机机端电压越限时, 切换为 MOZD, 同时控制电压稳定和功角稳定, 待电压回到正常范围并系统稳定时切换至 DTSMC。这样协调切换控制, 兼顾了不同情况下的稳定要求。综合上述的控制目的和原则, 可以采用如下的切换控制律。

$$u = \begin{cases} u_1 = -\frac{1}{\beta(x)} [\alpha(x) + \hat{\Omega}_x(x, w, u | \hat{\theta}) + \sum_{k=0}^{n-2} \alpha_k S_k^{(n-k-1)} + \\ \sum_{k=0}^{n-2} \beta_k \frac{d^{n-k-1}}{dt^{n-k-1}} S_k^{q_k/p_k} + k \cdot s_{n-1} + \gamma s_{n-1}^{q/p}], \\ U_t \leq U_{\text{low}}, \text{ or } U_t \geq U_{\text{up}}, \text{ or } |dU_t| \geq U_{\text{step}} \\ u_2 = \frac{-1}{\beta'(x, z_1)} [\alpha'(x, z_1) + \varepsilon \operatorname{sat} S + kS], \quad U_{\text{low}} < U_t < U_{\text{up}} \end{cases} \quad (39)$$

式中： U_{low} 、 U_{up} 、 U_{step} 分别为机端电压要求的上限、下限和预先设置的突变限值； u_1 为以功角稳定为主的 DTTSMC； u_2 为兼顾机端电压和稳定控制的 MOZD。

4 仿真研究

采用 1.1 节中的单机无穷大系统进行励磁控制仿真研究，系统模型如式(1)所示。系统参数如下： $\omega_0 = 2\pi f$ p.u.， $D = 0.1$ p.u.， $H = 7$ s， $T'_{d0} = 8$ s， $V_s = 0.995$ p.u.， $P_{m0} = 0.9$ p.u.， $x_d = 1.8$ ， $x'_d = 0.3$ ， $x_q = 1.76$ ， $x_T = 0.15$ p.u.， $x_{L1} = 0.5$ p.u.， $x_{L2} = 0.93$ p.u.。

分别设置机械功率阶跃、机械功率和励磁电压周期性扰动、变压器高压侧三相短路等扰动，观察设计的协调励磁控制对一般扰动、共振型低频振荡和大扰动的控制效果，将本文的励磁控制与电力系统稳定器加自动电压调节器(PSS+AVR)、线性最优励磁控制 LOEC^[22]、多指标非线性励磁控制 MONEC^[15] 和无协调励磁控制的 DTTSMC 进行比较与验证，其中 LOEC 选择 $Q = \text{diag}(1, 100, 5000)$ 。控制参数为：模糊扰动观测器每个变量采用 5 个模糊语言变量，共 125 条模糊规则，学习率 $\gamma = 600$ 。

4.1 输入机械功率调节扰动

设置输入机械功率在 1 s 时发生阶跃，从 0.9 阶跃到 0.95，图 1 给出了四种励磁控制的功角 δ 、电磁功率 P_e 和机端电压 V_t 的仿真结果。

由图 1 可见，扰动跟踪 Terminal 滑模协调励磁控制在机械功率阶跃扰动后系统状态量能迅速平滑

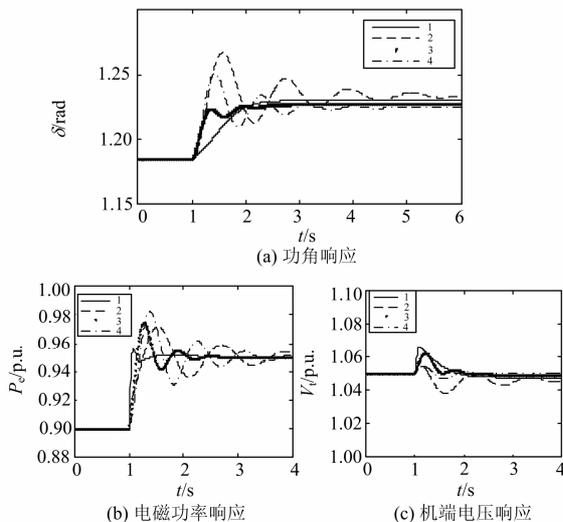


图 1 输入机械功率阶跃扰动系统响应曲线

Fig. 1 Response to P_m step disturbance

(1- DTTSMC-MOZD, 2-PSS+AVR, 3- LOEC, 4-MONEC)

的过渡到新的稳定平衡点，有功功率对机械功率的跟踪能力强；系统功角和转速能实现快速平滑过渡，系统有很好的功角稳定性；调节机械功率不会引起机端电压的偏差，机端电压静态精度很好。功角、有功功率、机端电压等的控制特性明显好于其他三种励磁控制，可见 DTTSMC-MOZD 在机械功率阶跃的小扰动仿真中表现了良好的控制调节性能，能满足系统的调节要求。

4.2 输入机械功率周期性扰动

在原动机输出机械功率中加入 5%幅值的功率扰动 $\Delta P_m = A_1 \sin(2\pi f \times t)$ ， $f = 1.11$ Hz (文献[9]算得系统自然振荡频率为 1.111 Hz)，以考察本文协调励磁控制抑制各种原动机脉动和其他扰动导致的原动机周期性机械功率扰动引起的共振型低频振荡效果。采用本文控制方法进行控制，发电机有关状态量响应曲线如图 2 所示。

图 2(a)表明未加控制的系统会发生严重的等幅共振型低频振荡。图 2(b)~图 2(f)表明，在机械功率周期性扰动下，FDO 能够很准确迅速的跟踪系统的综合扰动，并在控制中进行扰动补偿快速消除扰动影响，基本完全抑制了功角和转速的振荡。相对于其他控制方法，功率的振荡幅值也大为减小，只在较小的范围内波动，机端电压波动也在很小的范围

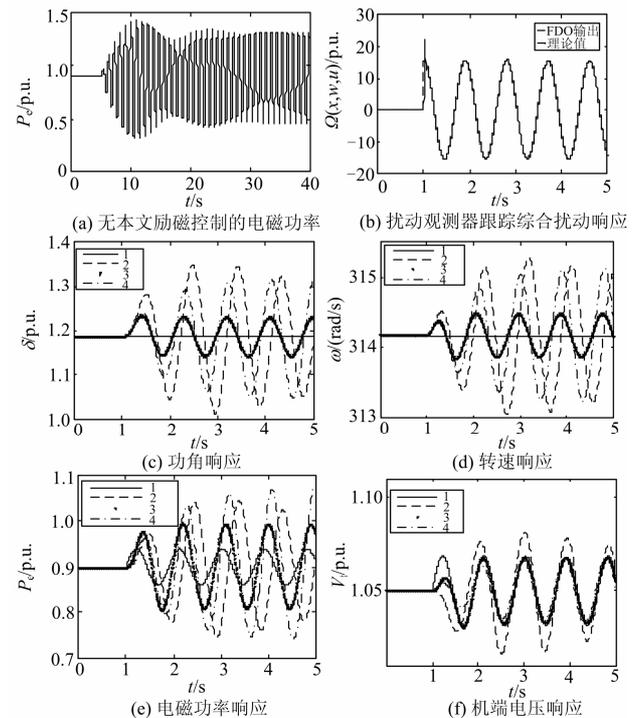


图 2 机械功率周期性扰动励磁控制响应曲线

Fig. 2 Response of excitation control to P_m periodic disturbance

(1- DTTSMC-MOZD, 2-PSS+AVR, 3- LOEC, 4-MONEC)

内, 未超限。可见扰动跟踪 Terminal 滑模协调励磁控制提高了系统阻尼功角振荡的能力, 具有强鲁棒性, 能较好的抑制发电机的机械功率周期性扰动引起的共振型低频振荡, 减小了共振型低频振荡对系统的危害, 提高了稳定性, 明显优于 PSS+AVR、LOEC、MONEC 等控制方法。

观察图 2(e)可见, 电磁功率仍存在约 0.05 p.u. 幅值的振荡, 分析 1.1 节模型(1)的第二个功率平衡方程可知, 电磁功率的这部分振荡是为了抵消 0.05 p.u.幅值的输入机械功率周期性扰动, 从而实现功角振荡的抑制, 这也基本是仅进行单输入励磁进行功角稳定控制能达到的最好控制效果, 其他控制未能达到这样的理想效果。此部分仅为外部扰动幅值大小的功率振荡, 在线路传输的功率中影响很小可忽略不计, 相比于共振型振荡所产生的很大倍数的振荡幅值其影响很小可不计。图 2(f)的机端电压的较小振荡也是因为此原因进行功率平衡而产生。

对于系统中周期性负荷扰动, 由于在单机系统中机端负荷包含于电磁功率 P_e 中, 故机端负荷的周期性扰动也可以用模型(1)功率平衡方程式中的外部扰动 w_1 来表示, 通过进行仿真发现机端负荷存在周期性扰动诱发的大幅值共振型低频振荡, 本文的控制器可将功角、功率等的共振振荡基本完全抑制, 电压仅在极小范围内波动, 限于篇幅不予赘述。

4.3 励磁输入周期性扰动

在原动机励磁输入中加入一个 5%幅值的扰动 $\Delta E_f = A_2 \sin(2\pi f \times t)$, $f = 1.11 \text{ Hz}$, 选用本文的励磁控制和其他励磁控制进行仿真, 发电机有关状态量响应曲线如图 3 所示, 未采用本文励磁控制时由图 3(a)所示可见系统发生了严重的等幅共振型低频振荡。

由图 3 可知, FDO 能够很敏锐的跟踪时变的周期性励磁扰动, 精度高速度快。进行扰动跟踪并补偿后, 功角、转速、电磁功率、机端电压等状态量的振动接近完全被抑制, 控制效果显著, 发电机励磁输入接近固有频率的周期性扰动引起的共振型低频振荡几乎完全被抑制, 机端电压振幅极小, 未超限, 明显比其他控制方法具有更好的控制效果。可见扰动跟踪 Terminal 滑模和多目标零动态协调励磁控制为系统提供了强阻尼和强鲁棒性, 能够通过扰动跟踪抵消系统的功角和功率振荡, 基本消除了发电机励磁扰动引起的共振型低频振荡, 提高了系统抗扰动和抗共振型低频振荡的能力, 从而提高了系统的动态稳定性。

在 4.2 节和 4.3 节的仿真中需指出, 有多个发电机的系统中, 当系统发电机存在周期性的小扰动时,

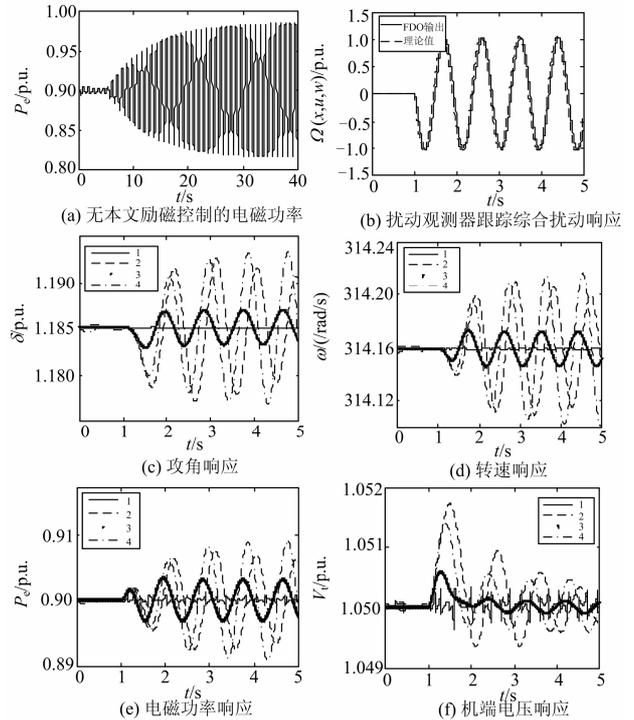


图 3 励磁输入周期性扰动励磁控制响应曲线

Fig. 3 Response of excitation control to E_f periodic disturbance (1- DTSMC-MOZD, 2-PSS+AVR, 3- LOEC, 4-MONEC)

需在扰动所在机组安装投入扰动跟踪 Terminal 滑模协调励磁控制才能抑制振荡, 若控制未安装在扰动源机组, 则仅能抑制安装控制的机组的振荡, 而扰动机组的振荡会仍然存在。当然也可以在利用 FDO 监测到发电机存在周期性扰动时再投入设计的励磁控制进行振荡抑制。

4.4 发电机高压侧短路故障

为了考察在大扰动下励磁控制的效果, 设置 1 s 时变压器高压侧出口一回线路发生严重的三相短路故障, 持续 0.1 s 后故障切除。功角和机端电压的响应曲线如图 4 所示。

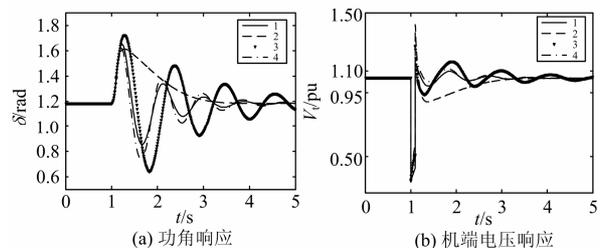


图 4 三相短路系统响应曲线

Fig. 4 Response to three-phase short circuit (1- DTSMC-MOZD, 2- DTSMC, 3- PSS+AVR, 4-MONEC)

由图 4 看出, 大扰动时, DTSMC-MOZD 控制和无协调励磁控制 DTSMC 具有很好的功角暂

态特性,很好的抑制功率振荡,控制效果几乎相同,大大增强了系统阻尼,要优于其他控制方法。但由于工程要求机端电压要在 0.95~1.1 p.u.之间(最低不低于 0.9 p.u.),而 DTTSMC-MOZD 控制在具有很强的功角振荡抑制能力的同时又有很好的机端电压暂态特性,维持机端电压能力强,大大降低了机端电压的超调,满足稳定控制和工程需求,而无协调励磁控制的扰动跟踪 Terminal 滑模和其他励磁控制的机端电压特性较差,超出限值过多,不符合要求,DTTSMC-MOZD 控制明显优于其他控制。

5 结论

本文针对单机系统在状态反馈精确线性化基础上设计了扰动跟踪 Terminal 滑模和多目标零动态协调励磁控制器。通过仿真和对比验证了其在多种扰动中都有较强的鲁棒性,能在小扰动和大扰动时提供强阻尼,使系统具有很好的暂态功角性能和机端电压特性,并提出且验证了能利用扰动跟踪 Terminal 滑模抑制共振型低频振荡;同时协调励磁控制的多目标滑模零动态设计能实现兼顾机端电压和功角稳定的控制,使大扰动后和机端电压突变后发电机的机端电压和功角都能有很好的暂态特性,具有较强的鲁棒性和可行性。

后续研究考虑将多重滑模和多目标滑模结合引入终端滑模控制中以达到更好的抑制一般振荡和共振型低频振荡的效果,进一步推广到多机系统进行分散励磁控制也是后续工作重要部分。

参考文献

[1] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 465-557.

[2] 石辉, 张勇军, 徐涛. 我国智能电网背景下的低频振荡应对研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 242-247.

SHI Hui, ZHANG Yongjun, XU Tao. Survey of response to LFO under the background of China smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 242-247.

[3] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[4] SUN Y Z, Li X, ZHAO M, et al. New Lyapunov function for transient stability analysis and control of power systems with excitation control[J]. Electric Power Systems Research, 2001, 57(2): 123-131.

[5] 于占勋, 陈学允. 非线性变结构控制理论及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(7): 86-88.

YU Zhanxun, CHEN Xueyun. Nonlinear variable structure control theory and its application in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(7): 86-88.

[6] 杨培宏, 刘文颖, 魏毅立, 等. 基于自适应逆推变结构方法的非线性励磁控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 125-129.

YANG Peihong, LIU Wenyong, WEI Yili, et al. Nonlinear excitation control based on adaptive backstepping and variable structure method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 125-129.

[7] 曾正, 刘涤尘, 廖清芬, 等. Terminal 滑模变结构励磁控制设计及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 1-6.

ZENG Zheng, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Design and simulation study on Terminal sliding mode variable structure excitation control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 1-6.

[8] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 29-33.

TANG Yong. Fundamental theory of forced power oscillation in power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 29-33.

[9] 马燕峰, 赵培龙, 赵书强. 多机电力系统的强迫功率振荡特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 23-29.

MA Yanfeng, ZHAO Peilong, ZHAO Shuqiang. Research on characteristics of forced power oscillation in multi-machine power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 23-29.

[10] 徐衍会, 贺仁睦, 韩志勇. 电力系统共振机理低频振荡扰动源分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 83-87.

XU Yanhui, HE Renmu, HAN Zhiyong. The cause analysis of turbine power disturbance inducing power system low frequency oscillation of resonance mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 83-87.

[11] 韩志勇, 贺仁睦, 徐衍会. 由汽轮机压力脉动引发电力系统共振机理的低频振荡研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 14-18.

HAN Zhiyong, HE Renmu, XU Yanhui. Power system low frequency oscillation of resonance mechanism induced by turbo-pressure pulsation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 14-18.

[12] 余一平, 闵勇, 陈磊, 等. 周期性负荷扰动引发强迫功

- 率振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 7-11.
YU Yiping, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Analysis of forced power oscillation caused by continuous cyclical load disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6): 7-11.
- [13] 万黎, 邓长虹, 陈允平. 考虑机端电压限制的多重非线性变结构励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 86-92.
WAN Li, DENG Changhong, CHEN Yunping. Multi-layer nonlinear variable structure excitation control considering voltage limitation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 86-92.
- [14] 王锡淮, 郑天府, 肖健梅. 带电压调节的非线性鲁棒励磁控制策略研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 38-42.
WANG Xihuai, ZHENG Tianfu, XIAO Jianmei. Nonlinear robust excitation control strategy with voltage regulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 38-42.
- [15] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 等. 一种高性能的非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 37-42.
LI Xiaocong, CHENG Shijie, WEI Hua, et al. A high performance nonlinear excitation control for generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 37-42.
- [16] 李啸骢, 邓裕文, 游晓枫, 等. 单输入单输出微分代数系统的多指标非线性控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 47-53.
LI Xiaocong, DENG Yuwen, YOU Xiaofeng, et al. Multi-index nonlinear control design for SISO differential algebraic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 47-53.
- [17] WANG L X. A course in fuzzy systems and control[M]. NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [18] KIM E. A fuzzy disturbance observer and its application to control[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002, 10(1): 77-84.
- [19] 贺昱曜, 闫茂德. 非线性控制理论及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
HE Yuyao, YAN Maode. Nonlinear control theory and application[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2007.
- [20] YU Shuanghe, YU Xinghuo, MAN Zhihong. A fuzzy neural network approximator with fast terminal sliding mode and its applications[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 148(3): 469-486.
- [21] YU Xinghuo, MAN Zhi-hong. Fast terminal sliding mode control design for nonlinear dynamical systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(2): 261-264.
- [22] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
LU Qiang, WANG Zhonghong, HAN Yingduo. Power system optimal control[M]. Beijing: Science Press, 1982.

收稿日期: 2014-03-25; 修回日期: 2014-12-07

作者简介:

栾某德(1988-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与分析、电力系统运行与控制; E-mail: lmdconfidence@163.com

陆巍(1964-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化;

刘涤尘(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力自动监控技术、电力系统稳定与控制、电力电子技术应用等。

(编辑 张爱琴)