

带电压调节的非线性鲁棒励磁控制策略研究

王锡淮, 郑天府, 肖健梅

(上海海事大学 电气自动化系, 上海 200135)

摘要: 针对电力系统的非线性特性和内外扰动的影响, 结合微分几何精确反馈线性化和非线性鲁棒 H_∞ 控制理论, 提出了一种新的励磁控制器设计方法, 在励磁控制规律引入了机端电压反馈, 使得所设计的控制器不仅提高了电力系统暂态稳定性, 而且在机械功率由于负荷或调速而变化时机端电压仍能回复到给定点上运行。将该控制方法运用到单机无穷大电力系统设计中, 用 Matlab/Simulink 进行三相短路实验和机械功率扰动实验, 结果表明: 与非线性励磁控制器及传统的 PID 控制器相比, 所设计的带电压调节功能的非线性鲁棒 H_∞ 控制器在提高电力系统的稳定性及稳定机端电压方面有很好的控制效果。

关键词: 电力系统; 非线性; PID; 微分几何; H_∞ ; 励磁控制

中图分类号: TM 761⁺.11

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)08-0038-05

0 引言

发电机励磁控制除维持机端电压恒定和保证并联运行的机组间无功功率合理分配外, 也是改善和提高电力系统稳定的最经济、有效的技术手段之一。

近二十年来, 随着现代控制理论和智能控制理论的发展, 线性最优励磁控制^[1]、非线性励磁控制^[2-6]、自适应控制^[7-8]、模糊神经网络控制^[9]、反步控制^[10]、基于迭代学习算法的励磁控制^[11]以及非线性预测控制^[12-13]等许多先进控制策略被广泛地应用到发电机励磁控制中, 特别是以微分几何为代表的精确反馈线性化方法在电力系统中的广泛应用^[2-3], 从理论上较好地解决了非线性系统的大范围线性化问题, 有效地提高了系统在大、小干扰方面的稳定性。但其建模仍然是基于固定的结构和参数而未考虑不确定性, 对此, 如何提高控制器的鲁棒性, 成为该方法面临的主要问题。

在电力系统的实际运行中, 存在着大量的不确定因素, 如稳态运行时负荷的波动、所建模型的不确定性、外界干扰、设备和负荷的随机投切等。这些因素对系统形成广义的干扰, 使得难以建立电力系统的精确数学模型。为解决电力系统中存在的不确定性因素的影响, 各种鲁棒控制方法应运而生。如非线性 L_2 增益控制方法^[14]、 H_∞ ^[15]控制等。

文献[15]根据直接反馈线性化和 H_∞ 控制理论进行了励磁控制器的设计, 由于引入了端电压偏差反馈, 所以设计的控制器不仅提高了系统的暂态稳定性, 而且满足了电压调节精度的要求。近年来, 不

少学者对 FACTS 控制器与发电机励磁协调控制进行了大量研究^[16-17], 而针对发电机励磁控制器进行协调控制的研究较少。现结合微分几何精确反馈线性化和非线性鲁棒 H_∞ 控制理论提出了一种新的控制器设计方法, 该方法分别对功角偏差 $\Delta\delta$ 和发电机端电压偏差 ΔU_t 进行协调控制设计, 由于考虑了电力系统的非线性特性、各种扰动的影响以及引入端电压反馈, 所以设计的控制器在提高电力系统稳定性、稳定机端电压和抑制扰动等方面有很好的控制效果。

1 微分几何状态反馈线性化与鲁棒非线性控制原理

考察带有扰动项的仿射非线性系统:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x})\mathbf{w} + \mathbf{g}_2(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{h}(\mathbf{x})\end{aligned}\quad (1)$$

式中 $\mathbf{x} \in R^n$, $\mathbf{u} \in R^m$, $\mathbf{w} \in R^r$, $\mathbf{y} \in R^s$ 分别为系统的状态向量、控制向量、干扰和调节输出向量; $\mathbf{f}$, $\mathbf{g}_1$, $\mathbf{g}_2$ 为相应维数的光滑函数向量或矩阵; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 是 $R^n \rightarrow R^s$ 的光滑映射, 且 $\mathbf{f}(0)=0$, $\mathbf{h}(0)=0$ 。

非线性鲁棒 H_∞ 控制问题就是要设计控制器 $\mathbf{u} = \mathbf{u}^*$, 使得闭环系统稳定, 即当 $\mathbf{w}=0$ 时, 系统渐近稳定;

且 $\int_0^\infty (\|\mathbf{y}\|^2 + \|\mathbf{u}\|^2) dt \leq \gamma^2 \int_0^\infty \|\mathbf{w}\|^2 dt$, 其中 $\gamma > 0$ 。

仿射非线性系统(1)的鲁棒 H_∞ 控制器设计一般可归结为一类偏微分不等式 Hamilton-Jacobi-Issacs 的求解问题^[13]。目前的研究结果表明, 难以求得该不等式的解析解。这就使得非线性鲁棒 H_∞ 直接应用于实际工程系统遇到困难。现以反馈线性化和线性 H_∞ 方法结合, 构造一类非线性鲁棒控制规律。

由微分几何精确反馈线性化理论知, 对于式(1)

所示的仿射非线性系统在坐标变换 $\mathbf{z}=\Phi(\mathbf{x})$ 和状态反馈 $\mathbf{v}=\alpha(\mathbf{x})+\beta(\mathbf{x})\mathbf{u}$ 的作用下,可以转化为 $\mathbf{z}$ 坐标下的与原系统精确等值的线性系统:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}_1\mathbf{w}' + \mathbf{B}_2\mathbf{v} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{z}\end{aligned}\quad (2)$$

式中 矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}_1$ 、 $\mathbf{B}_2$ 和 $\mathbf{C}$ 均为常数矩阵。

针对式(2)所示的线性系统,运用线性鲁棒 H_∞ 控制理论进行控制器的设计。状态反馈线性 H_∞ 控制就是寻找一状态反馈 $\mathbf{v}=\mathbf{K}\mathbf{z}$,使得闭环系统

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{z}} &= (\mathbf{A} + \mathbf{B}_2\mathbf{K})\mathbf{z} + \mathbf{B}_1\mathbf{w}' \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{z}\end{aligned}\quad (3)$$

的 L_2 增益小于一个实数 $\gamma > 0$,即对于 $\forall \mathbf{w}'(\cdot) \in L_2[0, \infty)$,若 $\mathbf{z}(0)=0$,响应为 $\mathbf{y}(\cdot)$,则有下式成立:

$$\int_0^\infty (\|\mathbf{y}(t)\|^2 + \|\mathbf{v}(t)\|^2)dt \leq \gamma_0^2 \int_0^\infty \|\mathbf{w}'(t)\|^2 dt \quad (4)$$

$$0 < \gamma_0 < \gamma$$

而且 $\mathbf{A} + \mathbf{B}_2\mathbf{K}$ 为稳定阵。

$\mathbf{K}$ 存在的充分必要条件为以下 Riccati 方程

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} + \frac{1}{\gamma^2}\mathbf{P}\mathbf{B}_1\mathbf{B}_1^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}_2\mathbf{B}_2^T\mathbf{P} + \mathbf{C}^T\mathbf{C} = 0 \quad (5)$$

存在正半定解 $\mathbf{P}^*$,且 $\mathbf{A} + \frac{1}{\gamma^2}\mathbf{B}_1\mathbf{B}_1^T\mathbf{P} - \mathbf{B}_2\mathbf{B}_2^T\mathbf{P}$ 为稳定阵,此时系统的次最优控制率和最坏干扰分别为

$$\begin{aligned}\mathbf{v}^* &= -\mathbf{B}_2^T\mathbf{P}^*\mathbf{z} \\ \mathbf{w}^{**} &= \frac{1}{\gamma^2}\mathbf{B}_1^T\mathbf{P}^*\mathbf{z}\end{aligned}\quad (6)$$

在坐标变换 $\mathbf{z}=\Phi(\mathbf{x})$ 和状态反馈 $\mathbf{v}=\alpha(\mathbf{x})+\beta(\mathbf{x})\mathbf{u}$ 的作用下并考虑到式(6)可得仿射非线性系统(1)的非线性 H_∞ 控制规律为

$$\begin{aligned}\mathbf{u}^* &= -\beta^{-1}(\mathbf{x})[\alpha(\mathbf{x}) - \mathbf{v}^*] = \\ &= -\beta^{-1}(\mathbf{x})[\alpha(\mathbf{x}) + \mathbf{B}_2^T\mathbf{P}^*\Phi(\mathbf{x})]\end{aligned}\quad (7)$$

2 在单机无穷大电力系统中的应用

考虑具有单回线的单机无穷大电力系统,假定同步发电机采用静止晶闸管快速励磁方式,即励磁机时间常数 $\tau_e=0$;忽略发电机瞬变凸极效应。在上述2个假设下可得考虑扰动下的励磁系统三阶数学模型:

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} &= \frac{\omega_0}{H}(P_m - P_e - P_D) + d_2\mathbf{w} \\ \dot{E}_q' &= -\frac{E_q'}{\tau_{d0}'} + \frac{u_f}{\tau_{d0}'} + d_3\mathbf{w} \\ P_e &= \frac{E_q'U_s}{x_{d\Sigma}'}\sin\delta, \quad P_D = \frac{D}{\omega_0}(\omega - \omega_0)\end{aligned}\quad (8)$$

式中 δ 为发电机转子运行角; ω 为发电机转子角速度; ω_0 为发电机稳态角速度; H 为机械转子惯量; E_q' 为 q 轴暂态电势; D 为阻尼系数; τ_{d0}' 为发电机定子开路时励磁绕组的时间常数; $x_{d\Sigma}' = x_d' + x_T + x_L$; u_f 为励磁控制输出电压; P_m 为发电机的机械功率; P_e 为发电机电磁有功功率; P_D 为

发电机阻尼功率; $d_2\mathbf{w}$ 、 $d_3\mathbf{w}$ 分别为发电机转动轴上的扭转干扰和励磁绕组的电磁干扰。

把式(8)表示为仿射非线性系统(1)的标准形式,取状态变量 $\mathbf{x}=[\delta, \omega, E_q']^T$,则

$$\begin{aligned}\mathbf{f}(\mathbf{x}) &= [\omega - \omega_0 \quad \omega_0(P_m - P_e - P_D)/H \quad -E_q'/\tau_{d0}']^T \\ \mathbf{g}_1(\mathbf{x}) &= [0 \quad d_2 \quad d_3]^T, \quad \mathbf{g}_2(\mathbf{x}) = [0 \quad 0 \quad 1/\tau_{d0}']^T\end{aligned}$$

取式(8)的输出为

$$\mathbf{y} = h(\mathbf{x}) = \delta - \delta_0 = \Delta\delta \quad (9)$$

现计算系统(8)的相对阶:

$$L_{g_2}h(\mathbf{x}) = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot [0 \quad 0 \quad 1/\tau_{d0}']^T = 0$$

$$L_f h(\mathbf{x}) = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \Delta\omega$$

$$L_f^2 h(\mathbf{x}) = [0 \quad 1 \quad 0] \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}) = -\frac{\omega_0}{H}(\Delta P_e + P_D)$$

$$L_{g_2}L_f h(\mathbf{x}) = [0 \quad 1 \quad 0] \cdot [0 \quad 0 \quad 1/\tau_{d0}']^T = 0$$

$$L_{g_2}L_f^2 h(\mathbf{x}) = [c_1 \cos \delta \quad -D/H \quad c_2 \sin \delta] \times [0 \quad 0 \quad 1/\tau_{d0}']^T = c_3 \sin \delta \neq 0$$

$$c_1 = -\frac{\omega_0 E_q' U_s}{H x_{d\Sigma}'}, c_2 = -\frac{\omega_0 U_s}{H x_{d\Sigma}'}, c_3 = -\frac{\omega_0 U_s}{H \tau_{d0}' x_{d\Sigma}'}$$

根据微分几何理论,由

$$L_{g_2}h(\mathbf{x})=0, \quad L_{g_2}L_f h(\mathbf{x})=0, \quad L_{g_2}L_f^2 h(\mathbf{x}) \neq 0$$

知系统(8)的相对阶 $r=3$ 。原三阶系统可以有三阶通过反馈线性化。取坐标变换式:

$$\mathbf{z} = \Phi(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} h(\mathbf{x}) \\ L_f h(\mathbf{x}) + L_{g_1}h(\mathbf{x})\mathbf{w} \\ L_f^2 h(\mathbf{x}) + L_{g_1}L_f h(\mathbf{x})\mathbf{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} \quad (10)$$

易验证坐标变换 $\mathbf{z}=\Phi(\mathbf{x})$ 为同胚变换。

则系统(8)在坐标变换式(10)及状态反馈 $\mathbf{v}=\alpha(\mathbf{x})+\beta(\mathbf{x})\mathbf{u}$ 下转变为完全可控的线性系统:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= z_3 \\ \dot{z}_3 &= -\frac{\omega_0}{H}(\dot{P}_e + \dot{P}_D) + d_2\dot{\mathbf{w}} = \mathbf{v} + \mathbf{w}'\end{aligned}$$

由上式可得下面线性系统:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}_1\mathbf{w}' + \mathbf{B}_2\mathbf{v} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{z}\end{aligned}\quad (11)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 = [0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 0]$$

把式(12)代入式(5)可求得正半定解 $\mathbf{P}^*$:

$$\mathbf{P}^* = \begin{bmatrix} \frac{2\gamma^{1/3}}{(\gamma^2-1)^{1/6}} & \frac{2\gamma^{2/3}}{(\gamma^2-1)^{1/3}} & \frac{\gamma}{(\gamma^2-1)^{1/2}} \\ \frac{2\gamma^{2/3}}{(\gamma^2-1)^{1/3}} & \frac{3\gamma}{(\gamma^2-1)^{1/2}} & \frac{2\gamma^{4/3}}{(\gamma^2-1)^{2/3}} \\ \frac{\gamma}{(\gamma^2-1)^{1/2}} & \frac{2\gamma^{4/3}}{(\gamma^2-1)^{2/3}} & \frac{2\gamma^{5/3}}{(\gamma^2-1)^{5/6}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据赫维塞得法可以验证当 $\gamma > 1.0$ 时, $\mathbf{P}^*$ 是正定的,且 $\mathbf{A} + \frac{1}{\gamma^2}\mathbf{B}_1\mathbf{B}_1^T\mathbf{P} - \mathbf{B}_2\mathbf{B}_2^T\mathbf{P}$ 为稳定阵,可见线性系统的 L_2 增益是一个大于 1.0 的常数,其次最优控制率和最坏干扰分别为

$$\begin{aligned} v^* &= -B_2^T P^* z = -P_{31}^* z_1 - P_{32}^* z_2 - P_{33}^* z_3 \\ w^* &= \frac{1}{\gamma^2} B_1^T P^* z = \frac{1}{\gamma^2} (P_{31}^* z_1 + P_{32}^* z_2 + P_{33}^* z_3) \end{aligned} \quad (14)$$

由反馈控制规律式(7),令

$$a(x) = -\beta^{-1}(x)\alpha(x), \quad b(x) = \beta^{-1}(x)$$

利用微分几何精确反馈线性化理论可得:

$$\begin{aligned} a(x) &= -[L_{g_2} L_{f^2} h(x)]^{-1} L_{f^3} h(x) = \\ &= -\tau'_{d0} E'_q \delta \frac{\cos \delta}{\sin \delta} + E_q - \frac{D x'_{d\Sigma} \tau'_{d0}}{\omega_0 U_s \sin \delta} \dot{\omega} \end{aligned} \quad (15)$$

$$b(x) = [L_{g_2} L_{f^2} h(x)]^{-1} = -\frac{H \tau'_{d0} x'_{d\Sigma}}{\omega_0 U_s \sin \delta}$$

根据反馈变换式 $z = \Phi(x)$, 状态反馈 $v = \alpha(x) + \beta(x)u$ 以及式(14)可以得到发电机非线性励磁控制规律为

$$\begin{aligned} u_{f1} &= -\tau'_{d0} E'_q \delta \frac{\cos \delta}{\sin \delta} + E_q - \\ &= \frac{D x'_{d\Sigma} \tau'_{d0}}{\omega_0 U_s \sin \delta} \dot{\omega} - \frac{H \tau'_{d0} x'_{d\Sigma}}{\omega_0 U_s \sin \delta} v^* \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)所示的非线性励磁控制规律未引入端电压反馈,为了满足机端电压稳定要求,所设计的控制器必须满足机端电压 U_t 的控制目标。

为此,取坐标变换方程为

$$z_4 = U_t - U_{t0} = \Delta U_t \quad (17)$$

式中 U_t 为发电机机端电压, U_{t0} 为其初始值。

令 $\Delta \dot{U}_t = U_2$, 则由线性系统稳定控制理论,可以得到:

$$U_2 = k_t \Delta U_t \quad (18)$$

由于电压精度是在运行点附近的小范围内进行讨论,按照小范围线性化的推导,存在关系如下^[18]:

$$\Delta U_t = \frac{1}{R_U} \Delta P_e - \frac{S_U}{R_U} \Delta \delta \quad (19)$$

$$\Delta \dot{U}_t = \frac{1}{R_U} \Delta \dot{P}_e - \frac{S_U}{R_U} \Delta \dot{\delta} = \frac{1}{R_U} \Delta \dot{P}_e - \frac{S_U}{R_U} \dot{\delta} \quad (20)$$

由式(8)知,

$$\Delta \dot{P}_e = \frac{\dot{E}'_q U_s \sin \delta}{x'_{d\Sigma}} + \frac{E'_q U_s \dot{\delta}}{x'_{d\Sigma}} \cos \delta \quad (21)$$

由式(8)(18)(19)(20)(21)可解得:

$$\begin{aligned} u_{f2} &= \frac{E'_q}{\tau'_d} \tau_{d0} - \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} U_s \cos \delta + \frac{x'_{d\Sigma} S_U \dot{\delta}}{U_s \sin \delta} \tau_{d0} - \\ &= \frac{E'_q \delta \cos \delta}{\sin \delta} \tau_{d0} + \frac{R_U x'_{d\Sigma} \tau_{d0}}{U_s \sin \delta} k_t \Delta U_t \end{aligned} \quad (22)$$

则可以得到同步发电机带端电压反馈的非线性鲁棒 H_∞ 励磁控制规律为

$$\begin{aligned} u_{f1} &= -\tau'_{d0} E'_q \delta \frac{\cos \delta}{\sin \delta} + E_q - \frac{D x'_{d\Sigma} \tau'_{d0}}{\omega_0 U_s \sin \delta} \dot{\omega} - \\ &= \frac{H \tau'_{d0} x'_{d\Sigma}}{\omega_0 U_s \sin \delta} (-P_{31}^* \Delta \delta - P_{32}^* \Delta \omega - P_{33}^* \dot{\omega}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{f2} &= \frac{E'_q}{\tau'_d} \tau_{d0} - \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} U_s \cos \delta + \frac{x'_{d\Sigma} S_U \dot{\delta}}{U_s \sin \delta} \tau_{d0} - \\ &= \frac{E'_q \delta \cos \delta}{\sin \delta} \tau_{d0} + \frac{R_U x'_{d\Sigma} \tau_{d0}}{U_s \sin \delta} k_t \Delta U_t \end{aligned}$$

令 $u_f = u_{f1} + u_{f2}$, 至此则完成了发电机励磁控制规律的设计。

3 仿真分析

为了研究所设计的励磁控制器的控制效果,借助于 Matlab/Simulink 仿真工具对单机无穷大系统进行仿真实验,并与发电机非线性励磁控制及 PID 控制效果进行了比较。单机无穷大系统中各参数为^[19]

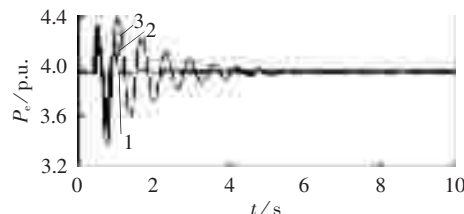
同步发电机参数 $H = 12.922$ s, $D = 0.15$ p.u., $U_s = 1.0$ p.u., $\tau_{d0} = 6.55$ s, $x_d = 0.8258$ p.u., $x'_d = 0.1045$ p.u.;

线路及变压器参数 $x_T = 0.0292$ p.u., $x_L = 0.0266$ p.u.;

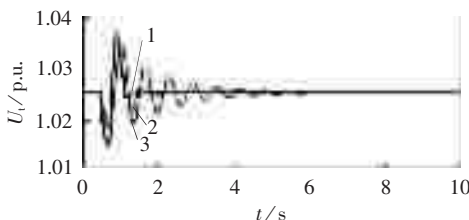
系统平衡点的参数 $\delta_0 = 0.7439$ rad, $\omega_0 = 314.16$ rad/s, $E'_{q0} = 0.9361$ p.u., $U_{t0} = 1.0253$ p.u., $U_{f0} = 1.838$ p.u.。

3.1 三相短路实验

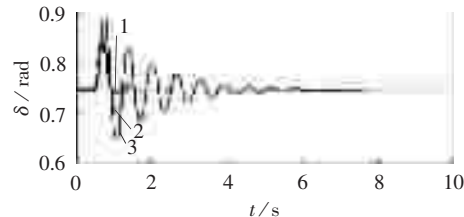
线路 1/2 处在 0.5 s 发生三相短路故障, 0.2 s 后切除故障后重合闸成功, 干扰抑制常数 $\gamma = 1.1$ 。发电机有功功率 P_e 、机端电压 U_t 及功角 δ 的动态响应曲线分别如图 1(a)(b)(c)所示。图中, 1 为非线性鲁棒控制器, 2 为非线性励磁控制器, 3 为 PID 控制器。从图 1 可以看出, 所设计的控制器具有很好的控制效果, 振荡次数少, 振荡幅度小及收敛速度快。



(a) 有功功率 P_e



(b) 机端电压 U_t



(c) 功角 δ

图 1 发电机三相短路实验

Fig.1 The three-phase short-circuit experiment of generator

3.2 机械功率扰动实验

机械功率 P_m 在 $t = 0.5$ s 时发生 10% 的阶跃扰动, 干扰抑制常数 $\gamma = 2.0$ 。图 2(a)(b)(c)给出了 P_e 、 U_t 和 δ 的动态响应曲线。从图 2(b)可以看出, 机械功率发生扰动时, 在所设计的控制器作用下, 机端电

压很快回到给定平衡点上运行,与其他控制器相比,振荡幅度小,恢复速度最快。

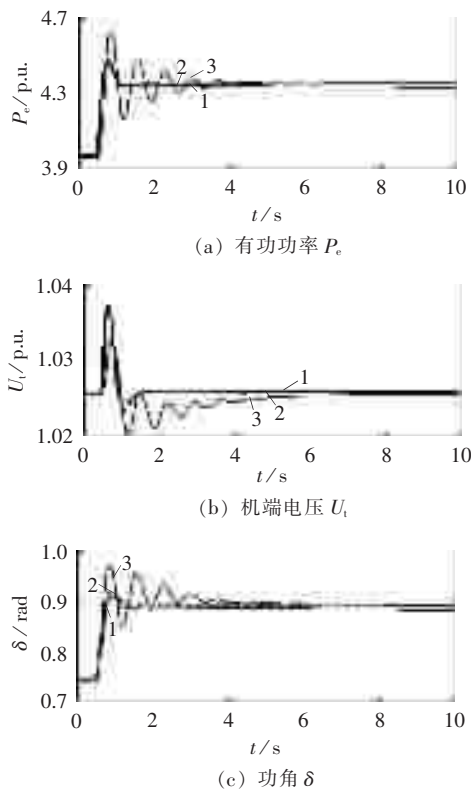


图2 发电机机械功率小扰动实验

Fig.2 The small mechanical power disturbance experiment of generator

4 结论

结合微分几何精确反馈线性化方法和线性 H_∞ 控制理论推导出了非线性鲁棒 H_∞ 励磁控制规律,考虑了机械功率由于负载或调速变化等因素影响时出现的机端电压偏移问题而设计了含有端电压反馈的励磁控制规律。该推导过程简单,易于工程实现,并在发电机三阶动态模型的基础上进行了数字仿真研究,仿真结果表明在三相短路故障及机械功率大小扰动下,在抑制超调量、减少调节时间和抑制振荡等方面,所设计的励磁控制器的控制效果均优于非线性励磁控制器和常规 PID 控制器,在改善电力系统暂态稳定性及稳定机端电压方面取得了显著的控制效果,且对电力系统中存在的干扰具有很强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 范澍,毛承雄,陆继明,等. 多机电力系统神经网络最优励磁控制器[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):80-84.
- FAN Shu, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al. Neural network based optimal excitation controller for multi-machine power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 80-84.
- [2] 李啸鸷,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 Xiao-cong, CHENG Shi-jie, WEI Hua, et al. A high performance nonlinear excitation control for generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 37-42.

- dings of the CSEE, 2003, 23(12): 37-42.
- [3] 胡兆庆,毛承雄,陆继明. 基于输入对状态反馈线性化的非线性励磁控制[J]. 继电器,2004,32(5):32-35.
- HU Zhao-qing, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming. Nonlinear excitation controller based on input-output linear [J]. Relay, 2004, 32(5): 32-35.
- [4] SCHAEFER R, KIYONG K. Excitation control of the synchronous generator[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, 7(2): 37-43.
- [5] 郝晋,王杰,陈陈,等. 基于 Hamilton 系统理论的结构保持多机电力系统非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报,2005,25(18): 6-12.
- HAO Jin, WANG Jie, CHEN Chen, et al. Nonlinear excitation control of multi-machine power system with structure preserving models based on Hamiltonian system theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 6-12.
- [6] 周雪松,马幼捷,何彦民. 复杂系统非线性励磁控制的数字仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(10):32-35.
- ZHOU Xue-song, MA You-jie, HE Yan-min. A digital simulation for nonlinear excitation control in a multi-machine system [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 32-35.
- [7] MENG Yue, SCHLUETER R. Nonlinear effects of a robust control design[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 508-510.
- [8] 赵辉,刘鲁源,王红君,等. 规则自适应模糊控制在同步发电机励磁系统中的应用[J]. 电网技术,2004,28(1):27-29.
- ZHAO Hui, LIU Lu-yuan, WANG Hong-jun, et al. Application of rule adaptive fuzzy control in synchronous generator exciting system[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 27-29.
- [9] 姜惠兰,魏强,唐晓骏. 基于模糊神经网络的发电机励磁控制器的研究[J]. 电网技术,2005,29(1):50-55.
- JIANG Hui-lan, WEI Qiang, TANG Xiao-jun. Study on the generator excitation controller based on fuzzy neural network[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 50-55.
- [10] 王江,李韬,曾启明. 基于神经网络的同步发电机励磁反步控制[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):140-145.
- WANG Jiang, LI Tao, TSANG Kai-ming. Backstepping control of the synchronous generator based on the neural networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 140-145.
- [11] 徐敏,林辉. 同步发电机迭代学习励磁控制器的仿真研究[J]. 电网技术,2005,29(12):81-84.
- XU Min, LIN Hui. Simulation of excitation controller of synchronous generator based on iterative learning control law[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 81-84.
- [12] 梁志珊,张化光,王红月,等. 同步发电机励磁非线性预测控制[J]. 中国电机工程学报,2000,20(12):52-56.
- LIANG Zhi-shan, ZHANG Hua-guang, WANG Hong-yue, et al. Nonlinear predictive control of synchronous machine excitation [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 52-56.
- [13] 刘辉,李啸鸷,韦化,等. 基于目标状态方程的非线性预测励磁控制器的设计[J]. 中国电机工程学报,2005,25(17):27-31.
- LIU Hui, LI Xiao-cong, WEI Hua, et al. The design of nonlinear predictive excitation controller based on TSE[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 27-31.
- [14] 兰海,李殿璞,杨丽华. 多机系统励磁的非线性 L_2 增益干扰抑制控制[J]. 电机与控制学报,2005,9(2):51-55.
- LAN Hai, LI Dian-pu, YANG Li-hua. Nonlinear L_2 gain disturbance attenuation control for multi-machine power system excitation[J]. Electric Machine and Control, 2005, 9(2): 51-55.
- [15] 蔡超豪. 非线性 H_∞ 励磁控制器的设计[J]. 电网技术,2003, 27(3):50-52.



- CAI Chao-hao. Design of non-linear H_{∞} excitation controller [J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 50-52.
- [16] KIYONG K, SCHAEFER R C. Tuning a PID controller for a digital excitation control system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(2): 485-492.
- [17] LU Qiang, MEI Sheng-wei, HU Wei, et al. Nonlinear decentralized disturbance attenuation excitation control via new recursive design for multi-machine power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(4): 729-736.
- [18] 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.

[19] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

王锡淮(1961-), 男, 江苏淮安人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为复杂系统建模与控制、电力系统(E-mail: wxh@shmtu.edu.cn);

郑天府(1981-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统鲁棒控制。

Nonlinear robust excitation control strategy with voltage regulation

WANG Xi-huai, ZHENG Tian-fu, XIAO Jian-mei

(Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

Abstract: Combined with the exact feedback linearization based on differential geometry and the nonlinear robust H_{∞} control theory, an excitation control strategy is proposed, which takes the nonlinearity of power system and the inner or external disturbances of power system into consideration and introduces the terminal voltage feedback of generator to control rules. The designed controller enhances the transient stability of power system and stabilizes the terminal voltage about the given operating point when mechanical power varies with load or speed regulation. It is applied to a single-machine infinite power system and tested by both three-phase short-circuit and mechanical power disturbance simulations with Matlab/Simulink. Results show that, compared with the nonlinear excitation controller and the traditional PID controller, the designed nonlinear robust H_{∞} controller with terminal voltage regulation has better control effect on stabilizing power system and generator terminal voltage.

This project is supported by the Science Project of Shanghai Education(04FA02).

Key words: power system; nonlinear; PID; differential geometry; H_{∞} ; excitation control

国电南自 PAS-300M 分布式控制系统成功投运

国电南京自动化股份有限公司过程自动化事业部自行研制的“PAS-300M 分布式控制系统”最近在河南省长葛市生物质能发电工程中得到了成功的应用, 该控制系统在机组正式投运生产三个月来一直在稳定高效地运行。长葛恒光发电厂是河南省首例生物质能发电的新型节能电厂, 为保证该电厂的投运, 国电南自派出了自动控制系统开发与设计的骨干力量。

PAS-300M 分布式控制系统软、硬件全部由国电南自自主开发, 并被鉴定为“部分软件技术, 全部硬件技术达到了国际先进水平”。此次在长葛现场投运, 其模块化智能 I/O 模件既能满足现场强抗干扰要求又能灵活布置, 软件操作人性化等特点获得用户全面肯定和一致好评。

当前, 我国正面临能源与环境问题的严峻挑战。采用新技术、新模式开发利用秸秆等农林废弃物生产电力, 涉及能源开发、环境保护、农村发展、生态平衡等诸多利益, 是事关我国国民经济可持续发展、能源安全和社会进步的重大问题。目前, 我国大部分秸秆主要用在农村炊事、取暖, 或丢失在田间腐烂、直接焚烧, 秸秆转换效率低下(仅 10% 左右), 不仅浪费时间, 而且污染环境。建设秸秆发电厂可以变废为宝、兴利除害, 节约资源、减少污染, 既缓解电力短缺, 又增加农民收入, 还可生产出含丰富钾、镁、磷、钙等元素的优质肥料, 降低农民施肥成本, 提高农作物产量和质量, 具有一系列的生态、社会 and 经济效益。

生物质能发电体现了“节能增效, 可持续发展”的方针政策, 为我国的电力事业开辟了一条新的道路。

为国家的“节能、环保”事业做贡献是国电南自发展电站自动化产品的主要目标, 此次工程是国电南自在生物质能发电厂自动控制中的一次有益探索。

(国电南自过程自动化事业部)