

发电机励磁与 SVC 的改进自适应反步无源协调控制

李啸骢, 陈登义

(广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要:考虑了阻尼系数的不确定性,提出了一种改进自适应反步无源协调控制策略,设计了发电机励磁与静止无功补偿器(SVC)的非线性协调控制器。采用浸入与不变(I & I)自适应控制设计了阻尼系数的自适应估计律,提高了控制器的自适应能力。基于反步法逐步递推,设计了 SVC 的控制律,并结合无源性理论,得到了发电机励磁的控制律。在反步法设计过程中,为了减小“微分爆炸”,将虚拟控制量的导数看作不确定项,并引入非线性阻尼算法对其进行处理。仿真结果表明,所设计的协调控制器明显地改善了电力系统的稳定性,并且具备较强的自适应性和鲁棒性。

关键词:励磁控制;静止无功补偿器;浸入与不变自适应控制;反步法;无源协调控制;非线性阻尼算法

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.011

0 引言

目前,我国电网规模越来越庞大和复杂,输电系统已发展成大容量、远距离、超高压的输电形式。随之而来的问题是电力系统的稳定性,使用柔性交流输电(FACTS)装置是解决这个问题经济且有效的方法。其中,静止无功补偿器(SVC)具有明显的优势。其响应速度很快,损耗低,具有较好的动态和连续无功调节能力等^[1],是一种较好的 FACTS 装置。另外,SVC 可以调节电网的无功功率,控制装设点的电压,提高电力系统的功角稳定性等^[2]。发电机励磁系统作为一种传统的控制对象,在解决电网的稳定性问题中展现了突出的作用效果。因此,设计发电机励磁与 SVC 的协调控制器,极具研究价值。

针对发电机励磁与 SVC 的协调控制,国内外已取得了丰硕的成果^[3-13]。文献[3]基于反馈线性化控制理论,设计了 SVC 与发电机励磁控制的间接自适应模糊控制器;文献[4]应用 Hamilton 函数方法,设计了发电机励磁与 SVC 的鲁棒协调控制器,可以有效地提高电力系统的暂态稳定性。除此之外,相关文献还采用了一些控制理论,包括:模糊控制^[5]、自抗扰控制^[6]、动态面控制^[7]、人工免疫算法^[8]、鲁棒控制^[9]和反步法^[10-13]等。由于电力系统本身就是一个非线性系统,采用非线性控制方法将最大程度地发挥其作用,因此,反步法作为一种简单且有效的非线性控制方法,已被广泛地应用于设计励磁与

SVC 的协调控制器中,并取得了较好的效果^[10-13]。但是,“微分爆炸”问题是反步法本身存在的缺陷,已有的文献主要采用动态面控制解决这一问题。但是,动态面控制会使系统的跟踪误差只能指数收敛到有界集内,并不是全局渐近稳定的。文献[14]将反步法虚拟控制的导数看作不确定项,引入鲁棒项解决了“微分爆炸”问题,并且系统满足全局渐近稳定。因此,本文采用文献[14]的思想,引入非线性阻尼算法处理不确定项,该算法设计过程简单,而且鲁棒性强。

本文针对发电机励磁和 SVC 的四阶系统模型,考虑了阻尼系数的不确定,并基于自适应反步法和无源性理论,设计了一种自适应鲁棒协调控制器。对于阻尼系数的不确定性,采用浸入与不变(I & I)自适应控制,设计其自适应估计律,增强其自适应能力。并且,引入非线性阻尼算法对反步法进行改进,以解决“微分爆炸”问题。

1 无源性设计方法

针对非线性系统,有:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x \in \mathbf{R}^n$; $u \in \mathbf{R}^m$; $f(x)$ 、 $g(x)$ 和 $h(x)$ 为光滑函数向量。

对于已知的供给率 $s(u, y)$,如果存在半正定的函数 $V(x)$,在 $\forall t \geq 0$ 的情况下,有耗散不等式(2)成立,当供给率 $s(u, y) = y^T u$ 时,称非线性系统(式(1))为无源系统。

$$V(x(t)) - V(x(0)) \leq \int_0^t s(u, y) dt \quad (2)$$

其中, $V(x)$ 为能量存储函数。

如果存在能量存储函数 $V(x)$ 和正定函数 $D(x)$,满足:

收稿日期:2017-10-05;修回日期:2018-08-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51267001);广西科学研究与技术开发计划项目(14122006-29);广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118338)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51267001),Guangxi Scientific Research and Technological Development Project(14122006-29) and Guangxi Natural Science Foundation(2014GXNSFAA118338)

$$V(\mathbf{x}(t)) - V(\mathbf{x}(0)) \leq \int_0^t \mathbf{y}^T \mathbf{u} dt - \int_0^t D(\mathbf{x}) dt \quad (3)$$

且对于所有的 $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$, 当 $t \geq 0$ 时式(3)都成立, 则系统(式(1))是严格无源的。

根据文献[10], 当双输入单输出系统 $(\mathbf{u}, y)$ 的相对阶为1时, 式(1)可转化为:

$$\begin{cases} \dot{z} = q(z, y) + p(z, y)u_2 \\ \dot{y} = \alpha(z, y) + \beta_1(z, y)u_1 + \beta_2(z, y)u_2 \end{cases} \quad (4)$$

取式(4)的控制律为:

$$\begin{cases} u_1 = \beta_1^{-1}(z, y) [-\beta_2(z, y)u_2(z) - \\ \alpha(z, y) - \frac{\partial W}{\partial z} \tilde{p}(z, y) + v] \\ u_2 = \gamma(z) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\tilde{p}(z, y) = q(z, 0) + p(z, 0)\gamma(z)$ 。

另外, 系统的李雅普诺夫函数 $W(z)$ 满足:

$$\dot{W} = \frac{\partial W}{\partial z} (q(z, 0) + p(z, 0)\gamma(z)) \leq \sigma(\|z\|) \quad (6)$$

其中, $\sigma(\cdot)$ 为 K 类函数。

取能量存储函数 $V(x)$ 为:

$$V = W(z) + 0.5y^2 \quad (7)$$

因为满足 $V \geq 0$ 和 $\dot{V} \leq 0$, 所以可以证明系统(式(4))是渐近稳定的。

2 系统模型的建立

将电网等效为单机无穷大系统, 在输电线路中安装 SVC, 如图1所示。

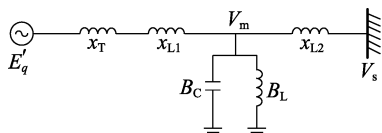


图1 含 SVC 的单机无穷大系统

Fig.1 Single-machine infinite-bus system with SVC

对于发电机励磁系统, 做如下假设: 发电机选用隐极机, 采用三阶模型; 忽略调速器的作用; 不考虑定子回路电阻和转子阻尼绕组的影响; SVC 采用一阶惯性方程式表示。故图1中系统的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{H}(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{H}(P_m - P_e) \\ \dot{E}'_q = -\frac{x_{d\Sigma}}{T_{d0}x'_{d\Sigma}}E'_q + \frac{(x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma})V_s}{T_{d0}x'_{d\Sigma}}\cos\delta + \frac{E_f}{T_{d0}} \\ \dot{B}_L = \frac{1}{T_{\text{sve}}}(-B_L + B_{L0} + K_{\text{sve}}u_{\text{sve}}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x'_{d\Sigma} &= x'_{1\Sigma} + x_{12} + x'_{1\Sigma}x_{12}(B_L - B_C) = x'_{1\Sigma} + x_{12} + \\ &x'_{1\Sigma}x_{12}(\Delta B_L + B_{L0} - B_C) = x'_{d\Sigma 0} + x'_{1\Sigma}x_{12}\Delta B_L \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x'_{d\Sigma 0} &= x'_{1\Sigma} + x_{12} + x'_{1\Sigma}x_{12}(B_{L0} - B_C), \quad x'_{1\Sigma} = x'_d + x_T + x_{L1} \\ x_{d\Sigma} &= x_{1\Sigma} + x_{12} + x_{1\Sigma}x_{12}(B_L - B_C) = x_{1\Sigma} + x_{12} + \\ &x_{1\Sigma}x_{12}(\Delta B_L + B_{L0} - B_C) \\ x_{1\Sigma} &= x_d + x_T + x_{L1}, \quad P_e = E'_q V_s \sin \delta / x'_{d\Sigma} \end{aligned}$$

其中, δ 为发电机功角, 单位为 rad; ω 为发电机转子角速度, 单位为 rad/s; P_m 为发电机的机械功率; P_e 为发电机的电磁功率; D 为阻尼系数; H 为发电机转子惯性时间常数, 单位为 s; V_s 为母线电压; E'_q 为发电机 q 轴暂态电动势; T_{d0} 为励磁绕组时间常数; E_f 为励磁控制电压; x_d 为发电机 d 轴电抗; x'_d 为发电机暂态电抗; x_T 为变压器电抗; x_{L1} 和 x_{12} 为线路电抗; B_L 为 SVC 的电感值, 初始值为 B_{L0} ; B_C 为 SVC 的电容值; T_{sve} 为 SVC 的时间常数; K_{sve} 为 SVC 的放大倍数; u_{sve} 为 SVC 的控制输入。

取状态变量如下: $x_1 = \delta - \delta_0$, $x_2 = \omega - \omega_0$, $x_3 = B_L - B_{L0}$, $x_4 = E'_q - E'_{q0}$ 。其中, δ_0 , ω_0 , B_{L0} , E'_{q0} 为相应的初始值。假定输入为 E_f 和 u_{sve} , 输出 $y = \Delta E'_q$, 可知其相对阶为1。令 $\theta = -D/H$, θ 为不确定参数。故式(8)可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \theta x_2 + a_1 \Delta P_e \\ \dot{x}_3 = a_2 x_3 + a_3 u_1 \\ \dot{y} = a_4 y + a_5 \cos(x_1 + \delta_0) + a_6 u_2 + b \end{cases} \quad (9)$$

其中, $a_1 = -\omega_0/H$; $a_2 = -1/T_{\text{sve}}$; $a_3 = K_{\text{sve}}/T_{\text{sve}}$; $a_4 = -x_{d\Sigma}/T_{d0}x'_{d\Sigma}$; $a_5 = (x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma})V_s/(T_{d0}x'_{d\Sigma})$; $a_6 = 1/T_{d0}$; $b = -x_{d\Sigma}E'_{q0}/(T_{d0}x'_{d\Sigma})$; $u_1 = u_{\text{sve}}$; $u_2 = E_f$; $\Delta P_e = (y + E'_{q0})V_s \sin(x_1 + \delta_0)/(x'_{d\Sigma 0} + \Delta x) - E'_{q0}V_s \sin \delta_0/x'_{d\Sigma 0}$, $\Delta x = x_{1\Sigma}x_{12}\Delta B_L$ 。

为了方便设计控制器, 将式(9)表示为矩阵形式:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \theta x_2 + a_1 V_s E'_{q0} \left[\frac{\sin(x_1 + \delta_0)}{x'_{d\Sigma 0} + \Delta x} - \frac{\sin \delta_0}{x'_{d\Sigma 0}} \right] \\ a_2 x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{a_1 V_s \sin(x_1 + \delta_0)}{x'_{d\Sigma 0} + \Delta x} \\ 0 \end{bmatrix} y + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_3 \end{bmatrix} u_1 = \\ f_1(\mathbf{x}) + f_2(\mathbf{x})y + g(\mathbf{x})u_1 \\ \dot{y} = a_4 y + a_5 \cos(x_1 + \delta_0) + a_6 u_2 + b \end{cases} \quad (10)$$

3 控制器的设计

发电机励磁与 SVC 协调控制器的设计过程主要如下: 在无励磁控制的条件下, 采用结合了 I & I 自适应控制和非线性阻尼算法的改进自适应反步法, 设计 SVC 的控制律 u_1 ; 应用无源性理论, 设计励

磁控制律 u_2 。

3.1 设计 SVC 的控制律 u_1

由式(9)可知,无励磁控制的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \theta x_2 + a_1 \Delta P_{e1} \\ \dot{x}_3 = a_2 x_3 + a_3 u_1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{其中, } \Delta P_{e1} = \frac{E'_{g0} V_s \sin(x_1 + \delta_0)}{x'_{d\Sigma 0} + \Delta x} - \frac{E'_{g0} V_s \sin \delta_0}{x'_{d\Sigma 0}}.$$

首先,根据 I & I 自适应控制方法,设计自适应估计律,其过程如下。

取估计误差为:

$$\eta = \hat{\theta} - \theta + \lambda(x_1, x_2) \quad (12)$$

其中, $\hat{\theta}$ 为 θ 的估计值; $\lambda(x_1, x_2)$ 为待设计的函数。

对式(12)求导,可得:

$$\dot{\eta} = \dot{\hat{\theta}} + \partial \lambda / \partial x_1 \cdot \dot{x}_1 + \partial \lambda / \partial x_2 \cdot \dot{x}_2 = \dot{\hat{\theta}} + \partial \lambda / \partial x_1 \cdot x_2 + \partial \lambda / \partial x_2 \cdot (\theta x_2 + a_1 \Delta P_{e1}) \quad (13)$$

取参数 θ 的自适应估计律为:

$$\dot{\hat{\theta}} = -\frac{\partial \lambda}{\partial x_1} x_2 - \frac{\partial \lambda}{\partial x_2} [(\hat{\theta} + \lambda(x_1, x_2)) x_2 + a_1 \Delta P_{e1}] \quad (14)$$

将式(14)代入式(13),可得:

$$\dot{\eta} = -\partial \lambda / \partial x_2 \cdot \eta x_2 \quad (15)$$

根据文献[15],取 $\lambda(x_1, x_2)$ 为:

$$\lambda(x_1, x_2) = \int_0^{x_2} x_2 dx_2 = 0.5 x_2^2 \quad (16)$$

将式(16)代入式(15),可得:

$$\dot{\eta} = -\eta x_2^2 \quad (17)$$

然后,采用改进反步法设计 SVC 的控制律,设计过程如下。

a. 定义 $e_1 = x_1$, $e_2 = x_2 - x_{2d}$, 其中 x_{2d} 为虚拟控制量。

对 e_1 求导,可得:

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 = x_2 = e_2 + x_{2d} \quad (18)$$

本文借鉴文献[14]的思想,将 e_2 看作不确定项,并做假设 1 如下:令 $|e_2| \leq \mu_1$, 其中 μ_1 为待设计的正常数。

应用非线性阻尼算法,设计 x_{2d} 为:

$$x_{2d} = -k_1 e_1 - \mu_1^2 e_1 / (2\varepsilon_1) \quad (19)$$

其中, $k_1 > 0$; $\mu_1^2 e_1 / (2\varepsilon_1)$ 为非线性阻尼项,用来补偿不确定项^[16],且 $\varepsilon_1 > 0$ 。

取式(11)第一阶 $\dot{x}_1 = x_2$ 的 Lyapunov 函数为:

$$V_1 = 0.5 e_1^2 \quad (20)$$

对 V_1 求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = \dot{e}_1 e_1 = e_1 e_2 + e_1 x_{2d} &= |e_1| |e_2| + e_1 x_{2d} \leq \\ &-k_1 e_1^2 + \mu_1 |e_1| - \mu_1^2 e_1^2 / (2\varepsilon_1) \end{aligned} \quad (21)$$

当满足 $|e_1| \geq 2\varepsilon_1 / \mu_1$ 时,有 $\dot{V}_1 \leq -k_1 e_1^2 \leq 0$ 。

b. 对 e_2 求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2d} &= \theta x_2 + a_1 \Delta P_{e1} - \dot{x}_{2d} = \\ &\theta x_2 + a_1 \Delta P_{e1d} + a_1 e_3 - \dot{x}_{2d} \end{aligned} \quad (22)$$

随着系统阶数的升高,计算虚拟控制量的导数将变得越来越繁琐,会引起“微分爆炸”问题。根据文献[14],将 $a_1 e_3 - \dot{x}_{2d}$ 看作不确定项,并做假设 2 如下:令 $|a_1 e_3 - \dot{x}_{2d}| \leq \mu_2$, 其中 μ_2 为待设计的正常数。

应用非线性阻尼算法,设计 ΔP_{e1d} 为:

$$\Delta P_{e1d} = -\frac{1}{a_1} \left[(\hat{\theta} + 0.5 x_2^2) x_2 + k_2 e_2 + \frac{\mu_2^2 e_2}{2\varepsilon_2} \right] \quad (23)$$

其中, $k_2 > 0$; $\mu_2^2 e_2 / (2\varepsilon_2)$ 为非线性阻尼项,用来补偿不确定项^[16],且 $\varepsilon_2 > 0$ 。

取式(11)前两阶的 Lyapunov 函数为:

$$V_2 = V_1 + 0.5 e_2^2 \quad (24)$$

对 V_2 求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \dot{e}_2 e_2 &= -k_1 e_1^2 + e_2 (\theta x_2 + a_1 \Delta P_{e1d} + a_1 e_3 - \dot{x}_{2d}) = \\ &-k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - \eta e_2 x_2 + |e_2| |a_1 e_3 - \dot{x}_{2d}| - \mu_2^2 e_2^2 / (2\varepsilon_2) \leq \\ &-k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - \eta e_2 x_2 + \mu_2 |e_2| - \mu_2^2 e_2^2 / (2\varepsilon_2) \end{aligned} \quad (25)$$

根据 LaSalle's 不变集定理可知,估计误差导数收敛到不变集 $E = \{ (x, \eta) \in \mathbf{R}^1 \times \mathbf{R}^1 : \eta x_2 = 0 \}$ 中,即有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \eta(t) x_2(t) = 0$ 成立,则 $\lim_{t \rightarrow \infty} \eta(t) x_2(t) e_2(t) = 0$ 。

当满足 $|e_2| \geq 2\varepsilon_2 / \mu_2$ 时,有:

$$\dot{V}_2 \leq -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - \eta e_2 x_2 \leq 0 \quad (26)$$

c. 定义 $e_3 = \Delta P_{e1} - \Delta P_{e1d}$, 其中 ΔP_{e1d} 为虚拟控制量。

对 e_3 求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 = \Delta \dot{P}_{e1} - \Delta \dot{P}_{e1d} &= c_1 \cos(x_1 + \delta_0) x_2 - \\ &c_2 \sin(x_1 + \delta_0) (a_2 x_3 + a_3 u_1) - \Delta \dot{P}_{e1d} \end{aligned} \quad (27)$$

其中, $c_1 = E'_{g0} V_s / x'_{d\Sigma}$; $c_2 = E'_{g0} V_s x_{1\Sigma} x_{12} / x_{12}^2 x'_{d\Sigma}$ 。

同理,将 $-\Delta \dot{P}_{e1d}$ 看作不确定项,并做假设 3 如下:令 $|\Delta \dot{P}_{e1d}| \leq \mu_3$, 其中 μ_3 为待设计的正常数。

应用非线性阻尼算法,设计 u_1 为:

$$\begin{aligned} u_1 = \frac{1}{a_3 c_2 \sin(x_1 + \delta_0)} &\left[c_1 x_2 \cos(x_1 + \delta_0) - \right. \\ &\left. a_2 c_2 x_3 \sin(x_1 + \delta_0) + k_3 e_3 + \mu_3^2 e_3 / (2\varepsilon_3) \right] \end{aligned} \quad (28)$$

取式(11)的全局 Lyapunov 函数为:

$$V_3 = V_2 + 0.5 e_3^2 \quad (29)$$

对 V_3 求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = \dot{V}_2 + e_3 \dot{e}_3 &= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - \eta e_2 x_2 - \\ &k_3 e_3^2 + |e_3| |-\Delta \dot{P}_{e1d}| - \mu_3^2 e_3^2 / (2\varepsilon_3) \leq \\ &-k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - \eta e_2 x_2 - k_3 e_3^2 + \mu_3 |e_3| - \mu_3^2 e_3^2 / (2\varepsilon_3) \end{aligned} \quad (30)$$

当满足 $|e_3| \geq 2\varepsilon_3 / \mu_3$ 时,有:

$$\dot{V}_3 \leq -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 - \eta e_2 x_2 \leq 0 \quad (31)$$

3.2 设计发电机励磁的控制律 u_2

令 $W(\mathbf{e}) = V_3$, 取整个系统的存储函数为:

$$V = W(\mathbf{e}) + 0.5y^2 \quad (32)$$

根据式(5), 设计 u_2 为:

$$u_2 = \frac{1}{a_6} \left[\frac{e_2 \omega_0 V_s}{H x'_{d\Sigma}} \sin(x_1 + \delta_0) - a_5 \cos(x_1 + \delta_0) - b + v \right] \quad (33)$$

对 V 求导, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{\partial W(\mathbf{e})}{\partial \mathbf{e}} \dot{\mathbf{e}} \bigg|_{y=0} + y \dot{y} = \\ &\quad \frac{\partial W(\mathbf{e})}{\partial \mathbf{e}} \dot{\mathbf{e}} \bigg|_{y=0} + a_4 y^2 + v y \leq \\ &\quad a_4 y^2 + v y \leq v y \end{aligned} \quad (34)$$

由于 $\dot{V} \leq v y$, 所以满足了无源性条件。另外, 取 $v = -k_4 y$, 其中 $k_4 > 0$ 。

综上所述, 发电机励磁与 SVC 协调控制器的控制律为:

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{a_3 c_2 \sin(x_1 + \delta_0)} [c_1 x_2 \cos(x_1 + \delta_0) - \\ \quad a_2 c_2 x_3 \sin(x_1 + \delta_0) + k_3 e_3 + \mu_3^2 e_3 / (2\varepsilon_3)] \\ u_2 = (1/a_6) [-a_1 e_2 V_s \sin(x_1 + \delta_0) / x'_{d\Sigma} - \\ \quad a_5 \cos(x_1 + \delta_0) - b + v] \end{cases} \quad (35)$$

因此, 系统(式(9))的闭环误差系统为:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - k_1 e_1 - \mu_1^2 e_1 / (2\varepsilon_1) \\ \dot{e}_2 = -\eta x_2 - k_2 e_2 - \mu_2^2 e_2 / (2\varepsilon_2) \\ \dot{e}_3 = -k_3 e_3 - \mu_3^2 e_3 / (2\varepsilon_3) \\ \dot{y} = a_4 y - e_2 a_1 V_s \sin(x_1 + \delta_0) / x'_{d\Sigma} + v \end{cases} \quad (36)$$

需要注意的是, 参数 θ 的自适应估计律的设计和反步法是分开的, 而且不用构造 Lyapunov 函数, 引入了函数 $\lambda(x_1, x_2)$, 突破了确定性-等价性原则; 与反步法相比, 在控制器的设计过程中, 本文的改进反步法没有了耦合项, 一定程度上解决了“微分爆炸”问题。

4 仿真分析

本文利用 MATLAB 进行仿真分析, 系统仿真参数如下: $H = 7$ s, $T_{d0} = 8$ s, $V_s = 1$ p.u., $x_d = 1.8$ p.u., $x'_d = 0.3$ p.u., $x_{d\Sigma} = 2.2$ p.u., $x'_{d\Sigma} = 0.7$ p.u., $T_{\text{sVC}} = 0.02$ s, $K_{\text{sVC}} = 1$, $\delta_0 = 70^\circ$, $\omega_0 = 314.159$ rad/s, $E'_{q0} = 1.5$ p.u., $B_{10} = 1$ p.u.。虚拟控制变量参数如下: $\mu_1 = \mu_2 = 1$, $\mu_3 = 2$, $k_1 = 7$, $k_2 = k_3 = 10$, $k_4 = 20$, $\varepsilon_1 = 0.3$, $\varepsilon_2 = 0.02$, $\varepsilon_3 = 0.01$ 。

4.1 小干扰情况下的仿真分析

$t = 0$ 时, 发电机功角偏离平衡点 3° , 转速 ω 、电磁功率 P_e 、SVC 安装处电压 V_m 、机端电压 V_l 的仿真结果如图 2 所示。图中, 实线为本文所提改进自适应反

步无源协调 IABPC (Improved Adaptive Backstepping Passive Coordinated) 控制下的仿真结果, 虚线为文献 [9] 采用的自适应反步无源协调 ABPC (Adaptive Backstepping Passive Coordinated) 控制下的仿真结果; 电磁功率 P_e 、SVC 安装处电压 V_m 、机端电压 V_l 均为标么值, 后同。

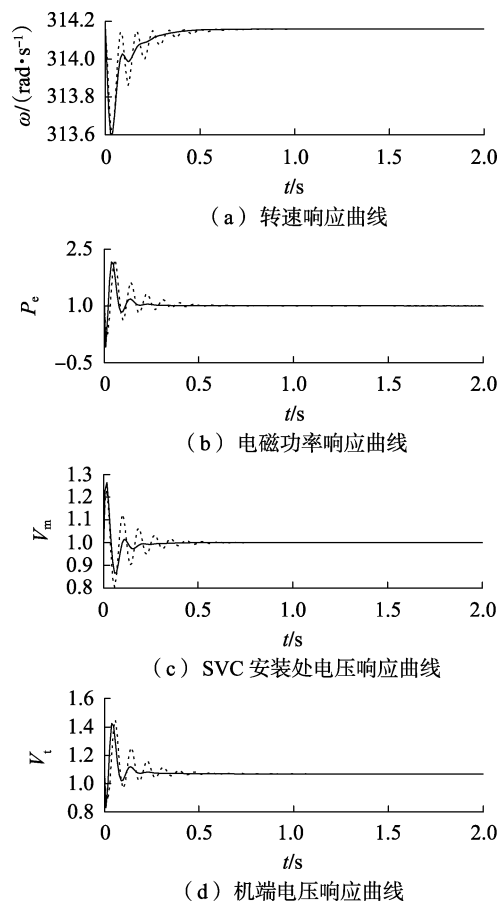


图 2 小干扰时仿真结果

Fig.2 Simulative results under small disturbance

由图 2 可以看出, 当系统受到小干扰时, 相比于 ABPC 控制方法, 采用 IABPC 控制方法可以快速地平息功率振荡, 恢复稳定的时间大约缩短了 60%, 证明了 IABPC 控制器具有较好的静态性能。

4.2 大干扰情况下的仿真分析

$t = 0.3$ s 时, 变压器高压侧母线出口处发生三相短路, 0.45 s 时切除故障。仿真结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 当系统受到大扰动时, 采用 IABPC 控制方法可以快速镇定受扰系统, 使其回到稳定状态, 收敛速度快, 振荡范围和幅度都小, 提高了系统的暂态稳定性, 其效果优于 ABPC 控制方法。

为了验证本文所设计的控制器具有较强的自适应能力, 将浸入与不变自适应反步 I & IAB (Immersion and Invariant Adaptive Backstepping) 法和自适应反步 AB (Adaptive Backstepping) 法进行对比分析, 仿真结果如图 4 所示。在仿真中, 取阻尼系数 $D = 1$, 则参

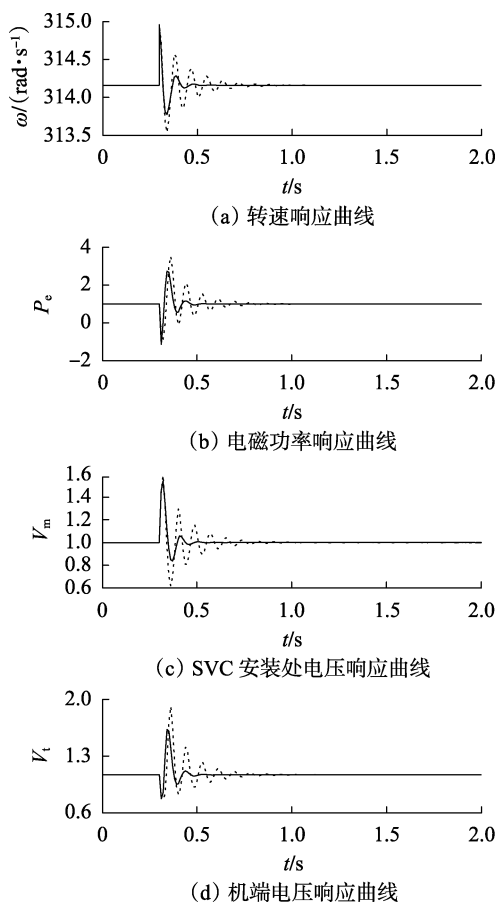
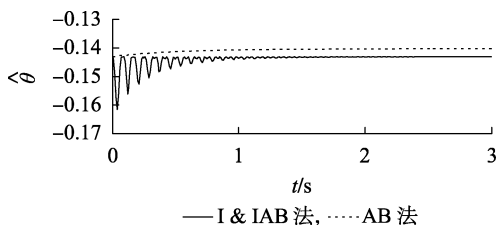


图 3 大干扰时仿真结果

Fig.3 Simulative results under large disturbance

图 4 参数 θ 估计性能对比Fig.4 Comparison of estimation performance of parameter θ

数 $\theta = -0.143$ 。由图 4 可知,相比于 AB 法,采用 I & IAB 法设计的自适应估计律更接近设定值,具有更强的自适应能力。

5 结论

本文针对含不确定参数的发电机励磁与 SVC 协调系统,采用 I & I 自适应控制、改进反步法和无源性理论,设计了一种改进自适应鲁棒协调控制器。将虚拟控制量的导数处理为不确定项,应用非线性阻尼算法,解决了反步法的“微分爆炸”问题。另外,自适应估计律的设计和反步法是独立的,并且无需构造 Lyapunov 函数,突破了确定性-等价性原则。基于 MATLAB 的仿真结果表明,本文的发电机励磁与 SVC 非线性协调控制器具有良好的暂态性能,改

善了电力系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 赵亚清,刘青,谢欢,等. 考虑源网协调的风电场动态无功补偿装置控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):118-123.
ZHAO Yaqing, LIU Qing, XIE Huan, et al. Dynamic reactive power compensator control considering source-grid coordination for wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 118-123.
- [2] 祁桂刚,黎灿兵,曹一家,等. SVC 和 TCSC 控制器间动态交互影响分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):65-69.
QI Guigang, LI Canbing, CAO Yijia, et al. Analysis on dynamic interaction between SVC and TCSC controllers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 65-69.
- [3] ABDELLAH L, YOUSSEF M, BOUSMAHA B, et al. The coordinated control of SVC and excitation of generators using adaptive fuzzy control[J]. International Journal of Engineering Science and Technology, 2011, 3(1):177-187.
- [4] 石访,王杰,薛贵挺. 基于 Hamilton 理论改善多机系统暂态稳定性的励磁与 SVC 协调控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):48-52.
SHI Fang, WANG Jie, XUE Guiting. Coordinated excitation and SVC control based on Hamilton theory for improving transient stability of multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 48-52.
- [5] 丁仁杰,张曙光. 基于瞬时无功功率理论和模糊控制的新型 SVC 控制算法[J]. 电力自动化设备,2008,28(11):26-29.
DING Renjie, ZHANG Shuguang. SVC control based on instantaneous reactive power theory and fuzzy control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 26-29.
- [6] 康忠健,勾松波,孟繁玉,等. SVC 与发电机励磁的非线性变结构协调控制[J]. 高电压技术,2008,34(5):995-1000.
KANG Zhongjian, GOU Songbo, MENG Fanyu, et al. Nonlinear variable structure controller of static var compensator cooperating with excitation system of generation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 995-1000.
- [7] ZHANG X Y, LIU C P, WANG J G, et al. Adaptive dynamic surface control for generator excitation control system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(1):1-11.
- [8] 陈赛赛,李可军,王卓迪,等. 新型混合 SVC 模型及其基于人工免疫算法的控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):93-99.
CHEN Saisai, LI Kejun, WANG Zhuodi, et al. Advanced hybrid SVC model and corresponding control strategy based on artificial immune algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 93-99.
- [9] 刘艳红,楚冰,汤洪海. 基于结构保留模型的静止无功补偿器鲁棒非线性控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):49-53.
LIU Yanhong, CHU Bing, TANG Honghai. Robust nonlinear control of static var compensator based on structure preserving model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 49-53.
- [10] 阮映琴,王杰. SVC 与发电机励磁无源协调 Backstepping 控制[J]. 电工技术学报,2007,22(6):135-140.
RUAN Yingqin, WANG Jie. Coordinated control for SVC and generator excitation based on passivity and Backstepping technique[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 135-140.

- [11] 邹德虎,王宝华. SVC 与发电机励磁的逆推 Terminal 滑模协调控制[J]. 电网技术,2011,35(4):108-111.
ZOU Dehu, WANG Baohua. Backstepping Terminal sliding mode coordinated control for SVC and generator excitation[J]. Power System Technology, 2011, 35(4):108-111.
- [12] LI W L. Nonlinear coordinated control for SVC and generator excitation based on sliding mode dynamic surface method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 229-231:2302-2305.
- [13] 张蕾,张爱民,景军锋,等. 静止无功补偿器与发电机励磁系统的自适应鲁棒协调控制策略[J]. 西安交通大学学报,2015,49(11):96-101.
ZHANG Lei, ZHANG Aimin, JING Junfeng, et al. A coordinated control strategy with adaptive robustness for static var compensators and generator excitation systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(11):96-101.
- [14] 王芳,宗群,田栢苓,等. 基于鲁棒自适应反步的可重复使用飞行器再入姿态控制[J]. 控制与决策,2014,29(1):12-18.
WANG Fang, ZONG Qun, TIAN Bailing, et al. Robust adaptive backstepping flight control design for reentry RLV[J]. Control and Decision, 2014, 29(1):12-18.
- [15] 付俊,柴天佑,苏春翌,等. 一类非线性系统的自适应输出跟踪控制[J]. 控制工程,2015,22(4):731-736.

FU Jun, CHAI Tianyou, SU Chunyi, et al. Adaptive output tracking control of a class of nonlinear systems[J]. Control Engineering of China, 2015, 22(4):731-736.

- [16] 郭一,刘金琨. 飞行器航迹倾角的自适应动态面控制[J]. 北京航空航天大学学报,2013,39(2):275-279.
GUO Yi, LIU Jinkun. Adaptive dynamic surface control for aircraft flight path angle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(2):275-279.

作者简介:



李啸聰

李啸聰(1959—),男,云南昆明人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统动态仿真及计算机实时控制、电力系统分析与控制、电力系统非线性控制等
(E-mail: lhtlht@gxu.edu.cn);

陈登义(1979—),男,广西南宁人,博士研究生,主要研究方向为电力系统非线性控制(E-mail: chendengyi2@163.com)。

Improved adaptive backstepping passive coordinated control for generator excitation and SVC

LI Xiaocong, CHEN Dengyi

(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: An improved adaptive backstepping passive coordinated control strategy is proposed to deal with the uncertain damping coefficients. A nonlinear coordinated controller for generator excitation and SVC(Static Var Compensator) is designed to improve its adaptability. The adaptive estimation law of damping coefficients is designed by using I & I(Immersion and Invariant) adaptive control to improve the adaptive ability of the controller. The control law of SVC is designed using the backstepping recursion, and the control law of generator excitation is hereby obtained based on the passivity theory. In the backstepping design, the derivative of the virtual control variable is considered to be uncertain, and the nonlinear damping algorithm is introduced to reduce the “differential explosion”. Simulative results indicate that the designed coordinated controller significantly improves the power system stability and exhibits satisfactory adaptability and robustness.

Key words: excitation control; SVC; immersion and invariant adaptive control; backstepping method; passive coordinated control; nonlinear damping algorithm