

DOI: 10.7652/xjtuxb201511016

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

张蕾¹, 张爱民², 景军锋¹, 李鹏飞¹

(1. 西安工程大学电子信息学院, 710048, 西安; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对输电系统的暂态稳定性易受到不确定参数和未知扰动的影响, 提出一种基于自适应逆推和 L_2 增益控制的静止无功补偿器(SVC)与发电机励磁系统的自适应鲁棒协调(SVC-EARC)控制策略。采用递推法构造被控系统 4 个子系统的 Lyapunov 函数和能量函数, 通过抵消不含扰动的项和含参数估计误差的项分别得到中间控制律和自适应律, 使能量函数满足耗散不等式从而保证子系统稳定, 递推至三阶子系统得到励磁控制律, 结合将励磁系统和 SVC 系统进行动态互联的中间变量, 最终完成 SVC 控制律的协调设计。仿真结果表明: SVC-EARC 控制策略可将状态变量暂态轨线收敛时间缩短至 2 s 内, 振荡幅值减少 10%; 自适应律能够有效地辨识不确定参数, 有效提高了输电系统的暂态稳定性。

关键词: 静止无功补偿器; 自适应逆推; L_2 增益控制; 协调控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)11-0096-06

A Coordinated Control Strategy with Adaptive Robustness for Static Var Compensators and Generator Excitation Systems

ZHANG Lei¹, ZHANG Aimin², JING Junfeng¹, LI Pengfei¹

(1. College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An adaptive robust coordinated (ARC) control strategy for static var compensators (SVC) and generator excitation systems named SVC-EARC is proposed based on the adaptive backstepping and L_2 -gain control method to solve the problem that the transient stability of a transmission system is susceptible to uncertain parameters and unknown disturbances. The Lyapunov functions and energy functions are recursively constructed for four sub-systems of the controlled system. Intermediate control laws and adaptive laws are designed by offsetting the items without disturbances and the items with estimation errors to make the energy functions satisfy dissipation inequation, and to guarantee the stability of the sub-systems. An excitation control law is obtained through three steps. The coordinate design of the SVC control law is completed by combining the intermediate variable that connects the excitation system with the SVC system. Simulation results show that the SVC-EARC control strategy achieves the convergence of the states within 2 s, and reduces the oscillation amplitudes by 10%. It can be

收稿日期: 2015-04-28。 作者简介: 张蕾(1981—), 女, 博士, 讲师; 张爱民(通信作者), 女, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177126); 陕西省教育厅科研计划资助项目(14JK1306); 西安工程大学学科建设经费资助项目(107090811); 西安工程大学博士科研启动基金资助项目(BS1337)。

网络出版时间: 2015-09-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150911.1048.004.html>

concluded that the adaptive law can effectively identify the uncertain parameter, and the transient stability of the system can be effectively improved.

Keywords: static var compensator (SVC); adaptive backstepping; L_2 -gain control; coordinated control

静止无功补偿器(SVC)具有实时调节无功功率的能力,能够改善电压质量、增强电气阻尼、提高电力系统的稳定性^[1-2]。在电网结构和运行条件日益复杂的情况下,SVC 调节系统和励磁控制系统之间的电气连接与交互影响不容忽略,通过 SVC 控制器与发电机励磁控制器的协调设计,可以有效缓解输电系统静态稳定性问题^[3]。目前,限制电网传输容量的主要矛盾是输电系统的暂态稳定性,因此协调控制需对系统中的不确定因素进行分析和处理^[4-5]。

为装设 SVC 的输电系统建立数学模型时,通常会做一些近似处理并假设参数已知,导致了未建模动态和不确定参数的存在^[6-7],而系统在运行过程中遭受短路故障、切除故障负荷或发电机故障等大扰动时,将导致系统当前的网络结构与建模时有所不同^[8]。此外,系统在运行时会随时遭受不确定扰动,如发电机轴上的扭矩干扰、励磁绕组上的电磁干扰以及负荷波动等,这些不确定性对系统的暂态稳定性的影响不容忽视^[9-11]。

目前,为了提高装设 SVC 的输电系统的暂态稳定性,主要采用一些非线性协调控制方法,如基于无源性理论^[12]、基于 H_∞ 理论^[13]以及基于耗散系统理论^[14]的鲁棒控制方法,基于逆推法和 Terminal 滑模面方法的自适应控制方法^[15]等,前 3 种方法基于能量的角度分析了系统的耗散特性和鲁棒稳定性的联系,针对不确定扰动改善了系统的稳定性,最后一种方法采用逆推法对系统进行降阶,并通过滑模控制辨识参数,针对不确定参数提高系统稳定性。然而,以上这些方法并未同时考虑系统中的不确定参数和未知扰动,需要在协调控制中结合鲁棒控制方法和自适应控制方法提高系统暂态稳定性。

为了解决上述问题,本文提出一种基于自适应逆推和 L_2 增益控制的 SVC 与发电机励磁的自适应鲁棒协调(SVC-EARC)控制策略,设计中兼顾控制系统的鲁棒性和参数自适应辨识能力。本文的协调控制策略包含了励磁控制律、SVC 控制律以及参数自适应律的设计,并递推设计了系统的 Lyapunov 函数,用于证明系统的鲁棒稳定性。与现有方法相比,本文所提策略可以有效提高输电系统在不确定因素影响下的暂态稳定性。

1 系统数学建模和控制目标

被控对象是线路中点装设 SVC 的单机无穷大输电系统,假设发电机采用带有励磁控制的三阶非线性动态模型,不计调速器的作用,且 SVC 采用一阶惯性模型,则具有 SVC 与发电机励磁协调控制的系统数学模型可以表示为式(1)~式(4)^[12-16]

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \quad (1)$$

式中: δ 是发电机的功角; ω 和 ω_0 分别是发电机转子角速度及其稳态值。

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} P_m - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} \frac{E'_q V_s \sin \delta}{x'_{d\Sigma}} + \omega_1 \quad (2)$$

式中: H 是转动惯量; P_m 是输出机械功率; D 是阻尼系数; E'_q 是发电机 q 轴暂态电动势; V_s 是无穷大母线电压; $x'_{d\Sigma}$ 是系统线路等效暂态电抗; ω_1 是发电机转子系统上遭受的未知扰动。

$$\dot{E}'_q = -\frac{x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma} T_{d0}} E'_q + \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma} T_{d0}} V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} u_F + \omega_2 \quad (3)$$

式中: $x_{d\Sigma}$ 是系统线路等效稳态电抗; T_{d0} 是励磁绕组时间常数; x_d 和 x'_d 分别是发电机 d 轴稳态电抗和暂态电抗; ω_2 是励磁回路上遭受的未知扰动; u_F 是发电机的励磁电压,为励磁系统的控制输入。

$$\dot{B}_L = \frac{1}{T_c} (-B_L + B_{L0} + K_c u_L) + \omega_3 \quad (4)$$

式中: B_L 和 B_{L0} 分别是 SVC 中电抗器连入系统的等效电纳和初始稳态值; T_c 和 K_c 分别是 SVC 控制系统时间常数和增益; ω_3 是 SVC 系统等效电纳上遭受的未知扰动; u_L 是 SVC 控制器的控制输入。 $w = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3]^T$ 为 L_2 空间的未知函数。

本文采用晶闸管控制电抗器+固定电容器(TCR+FC)型的 SVC,系统的总电纳为 $B_{SVS} = B_e (B_C + B_L) / (B_e + B_C + B_L)$,其中 B_C 为电容器的电纳, B_e 为 SVC 与输电系统之间变压器的电纳。为了简化分析,做如下的状态变量的选取和常量参数的替换: $x_1 = \delta - \delta_0$; $x_2 = \omega - \omega_0$; $x_3 = E'_q - E'_{q0}$; $x_4 = B_L - B_{L0}$; $k_1 = \frac{\omega_0}{H}$; $k_2 = \frac{\omega_0}{H} V_s$; $k_3 = -\frac{x_{d\Sigma}}{T_{d0}}$; $k_4 =$

$\frac{1}{T_{d0}}V_s; k_5 = \frac{1}{T_{d0}}; k_6 = \frac{1}{T_c}; k_7 = K_c; \theta = -\frac{D}{H}$ 。基于此,

系统式(1)~式(4)可以简化如下

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \theta x_2 + k_1 P_m - k_2 \frac{(x_3 + E'_{q0})}{x'_{d\Sigma}} \sin(x_1 + \delta_0) + w_1 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{k_3}{x'_{d\Sigma}}(x_3 + E'_{q0}) + \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} k_4 \cos(x_1 + \delta_0) + \\ &\quad k_5 u_F + w_2 \\ \dot{x}_4 &= k_6 (-x_4 + k_7 u_L) + w_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: x_1, x_2, x_3 和 x_4 为系统的状态变量。

因此,由式(5)表示的本文的被控系统包含不确定参数 θ 和不确定扰动 w 的非线性系统。本文研究的控制目标为通过自适应律的设计来辨识不确定参数 θ , 并通过励磁控制律 u_F 和 SVC 控制律 u_L 的协调设计来保证式(5)系统在遭受扰动的过渡过程中所有的状态变量一致有界, 并能够快速收敛到平衡状态。

2 自适应鲁棒协调控制系统设计

2.1 算法描述

首先,将系统进行降阶,拆分成4个低阶子系统^[17];然后,从最低阶子系统开始,采用逆推法构造子系统的 Lyapunov 备选函数(CLF),并构造扰动输入的能量函数,通过4个步骤依次对降阶子系统进行稳定性控制;最后,基于耗散系统理论,证明所设计的协调控制策略可以保证控制系统具有鲁棒扰动抑制的能力。

第1步 针对系统式(5)中最低阶的一阶降阶子系统 $\dot{x}_1 = x_2$, 将 x_2 视作虚拟控制输入, x_2^* 为中间控制律。同时,构造状态误差变量 $e_1 = x_1$ 和 $e_2 = x_2 - x_2^*$, 并将 x_2^* 设计为 $x_2^* = -c_1 x_1, c_1 > 0$ 。本文构造系统的第一个 CLF 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} \sigma_1 e_1^2 \quad (6)$$

式中: σ_1 为正常数。

第2步 针对由系统式(5)的前2个微分方程所构成的二阶降阶子系统,将 x_3 视作虚拟控制输入,将设计的中间控制律记作 x_3^* 。同时,构造状态误差变量 $e_3 = x_3 - x_3^*$ 。将为不确定函数 θ 设计的自适应律记为 $\dot{\hat{\theta}}$, 并定义 $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 为参数估计误差。

将上一步所构造的由式(6)表示的 CLF 函数进行扩展,增加误差变量 e_2 和参数估计误差 $\tilde{\theta}$, 从而在

CLF 函数中同时体现状态误差和参数估计误差的收敛特性。基于此,本文通过逆推设计法构造第2个 CLF 函数为

$$V_2 = \frac{1}{2} \sigma_1 e_1^2 + \frac{1}{2} \sigma_2 e_2^2 + \frac{1}{2\rho_1} (\theta - \hat{\theta})^2 \quad (7)$$

式中: ρ_1 为自适应增益; σ_2 为正常数。根据 L_2 增益控制方法,选取扰动 w_1 的能量存储函数为 $S_1 = V_2$ 。同时,构造下面的能量函数式

$$H_1 = \dot{S}_1 + \frac{1}{2} (\|y\|^2 - \gamma^2 \|w_1\|^2) \quad (8)$$

式中: $y = [q_1 x_1 \quad q_2 x_2]^T$ 为系统输出, $q_1, q_2 > 0$; γ 为输入 w_1 与输出 y 之间 L_2 增益的比值,为正数。该参数直接反映了控制系统对扰动抑制能力的强弱。理论上, γ 值选取越小则控制系统抑制扰动的能力越强,但过小的 γ 值实际中无法实现,需要结合实际情况进行选取^[1]。

将中间控制律 x_3^* 和参数自适应律 $\dot{\hat{\theta}}$ 设计为

$$x_3^* = \frac{x'_{d\Sigma}}{\sigma_2 k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} [\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \frac{1}{2} q_2^2 (x_2 + c_1 x_1)^2 + \sigma_2 \hat{\theta} x_2 - \varepsilon_1 e_2] - E'_{q0} \quad (9)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = -\rho_1 \sigma_2 e_2 x_2 \quad (10)$$

将式(9)、式(10)代入式(8)中,可整理为

$$H_1 = -\alpha e_1^2 - \varepsilon_1 e_2^2 - \left(\frac{1}{2} \gamma w_1 - \frac{\sigma_2}{\gamma} e_2 \right)^2 - \frac{1}{4} \gamma^2 w_1^2 - \frac{\sigma_2 k_2 \sin(x_1 + \delta_0)}{x'_{d\Sigma}} e_2 e_3 \quad (11)$$

式中: $\beta_1 = \frac{c_1 \sigma_2}{\gamma^2} + \sigma_1 - c_1 q_2^2$; $\beta_2 = \frac{\sigma_2}{\gamma^2} + c_1 \sigma_2$; $\varepsilon_1 > 0$; $\alpha = \sigma_1 c_1 - \frac{1}{2} q_1^2 - \frac{1}{2} c_1^2 q_2^2$; τ_1 为调节函数,且 $\tau_1 = \dot{\hat{\theta}} = -\rho_1 \sigma_2 e_2 x_2$ 。

第3步 针对由系统式(5)前3个微分方程所构成的三阶降阶子系统,将式(7)表示的 CLF 函数进行扩展,构造第3个 CLF 函数为

$$V_3 = \frac{1}{2} \sigma_1 e_1^2 + \frac{1}{2} \sigma_2 e_2^2 + \frac{1}{2} \sigma_3 e_3^2 + \frac{1}{2\rho_2} (\theta - \hat{\theta})^2 \quad (12)$$

式中: $\sigma_3 > 0$; $\rho_2 > 0$ 为自适应增益。选取不确定扰动 w_1 和 w_2 的能量存储函数为 $S_2 = V_3$ 。同时,构造下面的能量函数

$$H_2 = \dot{S}_2 + \frac{1}{2} (\|y\|^2 - \gamma^2 \|w_1\|^2 - \gamma^2 \|w_2\|^2) \quad (13)$$

在这一步,同时设计励磁控制输入 u_F 、虚拟控制律 v^* 和参数自适应律 $\dot{\hat{\theta}}$ 分别为

$$\begin{aligned}
u_F = & -\frac{1}{k_5} \{ (x_3 + E'_{q0}) [v^2 k_3 + \frac{\beta_2}{\sigma_2 \sin(x_1 + \delta_0)} + \\
& \frac{q_2^2 x_2 - c_1 x_1}{\sigma_2} + \hat{\theta}] - \frac{k_1 P_m}{v \sigma_2 k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} (q_2^2 x_1 + \\
& c_1 q_2^2 x_1 + \sigma_2 \hat{\theta} + \beta_2) - \frac{1}{v \sigma_2 k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} (\beta_1 x_2 + \\
& \beta_2 x_2 \hat{\theta} + q_2^2 x_2^2 \hat{\theta} + c_1 q_2^2 x_2^2 - c_1 q_2^2 x_1 x_2 \hat{\theta} - c_1 q_2^2 x_1 x_2 + \\
& \sigma_2 x_2 \hat{\theta}^2) + \frac{\cot(x_1 + \delta_0)}{v \sigma_2 k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} (\beta_1 x_1 x_2 + \beta_2 x_2^2 + \\
& \frac{1}{2} q_2^2 x_2^2 + c_1 q_2^2 x_1 x_2^2 + \frac{1}{2} c_1 q_2^2 x_1^2 x_2 + \sigma_2 x_2^2 \hat{\theta}) + \\
& v^2 (x_d - x'_d) k_4 \cos(x_1 + \delta_0) + \frac{\sigma_3}{v \gamma^3} e_3 + \\
& \frac{\sigma_3 (\beta_2 + q_2^2 x_2 + q_2^2 c_1 x_1 + \sigma_2 \hat{\theta})^2}{v \gamma^3} e_3 - \\
& \frac{\sigma_2 k_2 \sin(x_1 + \delta_0) v}{\sigma_3} e_2 + \epsilon_2 e_3 \} \quad (14)
\end{aligned}$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \sigma_3 \rho_2 e_3 \frac{\beta_2 x_2 + q_2^2 x_2^2 + q_2^2 c_1 x_1 x_2 + \sigma_2 \hat{\theta} x_2}{v^* \sigma_2 k_2 \sin(x_1 + \delta_0)} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
v^* = & -(\beta_2 x_2 + q_2^2 x_2^2 + q_2^2 c_1 x_1 x_2) / [x_2 \hat{\theta} + \\
& \frac{e_2 k_2 \sigma_2^2 x_2 \sin(x_1 + \delta_0)}{\sigma_3 e_3^2}] \quad (16)
\end{aligned}$$

式中: $v = \frac{1}{x_{d\Sigma}}$ 是与 SVC 系统的电纳 B_{SVS} 进行联系的中间变量, 即 $x'_{d\Sigma} = x_{L1} + x_{L2} + x_{L1} x_{L2} B_{SVS}$, x_{L1} 和 x_{L2} 分别为发电机到 SVC 接入点线路电抗和 SVC 至无穷大母线之间线路电抗。因此, v^* 是发电机三阶动态模型和 SVC 一阶动态模型之间互联的中间变量; $\epsilon_2 > 0$ 为设计的参数。

将式(14)~式(16)代入式(13)中, 整理后可得

$$\begin{aligned}
H_2 = & -\alpha e_1^2 - \epsilon_1 e_2^2 - \epsilon_2 \sigma_3 e_3^2 - \left(\frac{1}{2} \gamma w_1 - \frac{\sigma_2}{\gamma} e_2 \right)^2 - \\
& \left(\frac{\sigma_3 e_3}{v \gamma} - \frac{1}{2} \gamma w_2 \right)^2 - \left[\frac{\sigma_3 (\beta_2 + q_2^2 x_2^2 + q_2^2 c_1 x_1 + \sigma_2 \hat{\theta}) e_3}{v^2 k_2 \sigma_2 \gamma \sin(x_1 + \delta_0)} + \right. \\
& \left. \frac{1}{2} \gamma w_1 \right]^2 - \frac{1}{4} \gamma^2 w_2^2 \quad (17)
\end{aligned}$$

在第 2 步和第 3 步中都为不确定参数设计了自适应律, 为了避免出现过参数化问题, 设计第 2 个调节函数为

$$\tau_2 = \tau_1 \frac{\sigma_3 \rho_2 e_3 (\beta_2 + q_2^2 x_2 + q_2^2 c_1 x_1 + \sigma_2 \hat{\theta})}{\rho_1 e_2 \sigma_2^2 k_2 \sin(x_1 + \delta_0) v^*} \quad (18)$$

第 4 步 这一步针对整个被控系统式(5)。首先, 构造新的状态误差变量 $e_4 = x_4 - x_4^*$, 其中 x_4^* 为状态变量的期望输入。

将式(12)表示的 CLF 函数进行扩展, 构造第 4 个 CLF 函数为

$$V_4 = \frac{1}{2} \sigma_1 e_1^2 + \frac{1}{2} \sigma_2 e_2^2 + \frac{1}{2} \sigma_3 e_3^2 + \frac{1}{2} \sigma_4 e_4^2 \quad (19)$$

式中: $\sigma_4 > 0$ 。

选取不确定扰动 w_1 、 w_2 和 w_3 的能量存储函数为 $S_3 = V_4$ 。同时, 构造下面的能量函数

$$H_3 = \dot{S}_3 + \frac{1}{2} (\|y\|^2 - \gamma^2 \|w_1\|^2 - \gamma^2 \|w_2\|^2 - \gamma^2 \|w_3\|^2) \quad (20)$$

在这一步, 将 SVC 控制律 u_L 设计为

$$\begin{aligned}
u_L = & \frac{1}{k_7} x_4 - \frac{\sigma_4^2 e_4}{k_6 k_7 \gamma^2} - \frac{\epsilon_3 e_4}{k_6 k_7} - \\
& \frac{1}{k_6 k_7} \left(\frac{\sigma_3 e_3^2 x_2 \hat{\theta} + k_2 \sigma_2^2 e_2 x_2 \sin(x_1 + \delta_0)}{\sigma_3 e_3^2 (\beta_2 x_2 + q_2^2 x_2^2 + q_2^2 c_1 x_1 x_2) x_{L1} x_{L2}} \right) \quad (21)
\end{aligned}$$

2.2 控制系统扰动抑制鲁棒性证明

将式(21)所表示的 SVC 控制律 u_L 和式(18)所

表示的参数自适应律 $\dot{\hat{\theta}} = \tau_2$ 代入式(20)中, 可得

$$\begin{aligned}
H_3 = & -\alpha e_1^2 - \epsilon_1 e_2^2 - \epsilon_2 \sigma_3 e_3^2 - \epsilon_3 \sigma_4 e_4^2 - \\
& \left(\frac{1}{2} \gamma w_1 - \frac{\sigma_2}{\gamma} e_2 \right)^2 - \left(\frac{\sigma_3 e_3}{v \gamma} - \frac{1}{2} \gamma w_2 \right)^2 - \\
& \left(\frac{\sigma_4 e_4}{\gamma} - \frac{1}{2} \gamma w_3 \right)^2 - \frac{1}{4} \gamma^2 w_2^2 - \frac{1}{4} \gamma^2 w_3^2 - \\
& \left[\frac{\sigma_3 (\beta_2 + q_2^2 x_2^2 + q_2^2 c_1 x_1 + \sigma_2 \hat{\theta}) e_3}{v^2 k_2 \sigma_2 \gamma \sin(x_1 + \delta_0)} + \frac{1}{2} \gamma w_1 \right]^2 \quad (22)
\end{aligned}$$

由式(22)可知 $H_3 \leq 0$, 即

$$\begin{aligned}
\dot{V}_4 + \frac{1}{2} (\|y\|^2 - \gamma^2 \|w_1\|^2 - \gamma^2 \|w_2\|^2 - \\
\gamma^2 \|w_3\|^2) \leq 0 \quad (23)
\end{aligned}$$

根据 L_2 增益抑制理论, 令能量存储函数 $V = 2S_3 = 2V_4$, 能量供给率函数 $S = \gamma^2 \|w_1\|^2 + \gamma^2 \|w_2\|^2 + \gamma^2 \|w_3\|^2 - \|y\|^2$, 并将式(23)两边进行积分可得

$$\begin{aligned}
V(x(t) - x(0)) \leq \int_0^t (\gamma^2 \|w_1\|^2 + \gamma^2 \|w_2\|^2 + \\
\gamma^2 \|w_3\|^2 - \|y\|^2) dt \quad (24)
\end{aligned}$$

由式(24)可知, 在能量供给率函数为 S 和能量存储函数为 V 时, 系统满足耗散性, 由文献[1]中所述 L_2 增益抑制理论可知, 控制系统对于扰动 w 具有不大于 γ 的 L_2 增益, 证明所设计的协调控制策略可以保证控制系统具有 L_2 增益下的鲁棒扰动抑制能力。

3 仿真结果与分析

采用 Matlab/Simulink 工具建立由式(5)所描述的 SVC 与发电机励磁协调控制系统模型。其中无穷大系统中各参数设置如下^[9,11,14-15]: 电压基准值设为 10 kV; 功率基准值设为 110 MV · A; $H = 5.9$

$\text{kg} \cdot \text{m}^2$; $V_s = 10 \text{ kV}$; $P_m = 110 \text{ MW}$; $\omega_0 = 314.159 \text{ rad/s}$; $\delta_0 = 58.15^\circ$; $T_c = 0.02 \text{ s}$; $K_c = 1.0$; $X_1 = 0.84 \Omega$; $X_2 = 0.52 \Omega$; $B_o = 0.25 \text{ S}$; $B_c = 0.33 \text{ S}$ 。将不确定扰动建模为 L_2 空间函数^[4]: $w_1 = e^{-2t} \sin(5t)$ 、 $w_2 = e^{-2t} \cos(5t)$ 和 $w_3 = e^{-2t} \sin(5t)$ 。SVC-EARC 控制器的相关参数设置为: $q_1 = 0.6$; $q_2 = 0.4$; $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = 0.1$; $\gamma = 0.5$; $\rho_1 = 3$; $\rho_2 = 5$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.5$ 。系统初始状态点选为 $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。系统中不确定阻尼系数真值设置为 $D=1$, 则不确定参数 θ 的真值为 $\theta \approx 0.1695$, 估计器初始值设置为 0。

对以下情况进行仿真: 系统初始工作在稳态, 当 $t=0.2 \text{ s}$ 时, SVC 所连母线右侧出口处发生三相短路, 且在 $t=0.3 \text{ s}$ 时系统故障被切除, 在这个过程中, 将 SVC-EARC 控制方法与参考文献[15]中发电机励磁采用传统电力系统稳定器(PSS)加上自动电压调节器(AVR), SVC 采用 PI 控制的常规分开(SVC-EDC)控制方法, 在相同的初始条件下进行比较。

图1、图2为状态变量 x_1 和 x_2 在两种不同控制方法下的暂态响应轨线。 x_1 和 x_2 表示的是发电机的转子角和转子角速度的暂态响应特性, 直接反映发电机功角的暂态性能。由图1可见, 在 SVC-EARC 控制作用下, x_1 在 1.5 s 左右就收敛到稳态, 而 SVC-EDC 则需要 3.3 s 左右, 且第一摆振荡幅值减少 30% 左右。从图2可见, x_2 的响应速度在 SVC-EARC 控制方法作用下有大幅提高, 振荡幅值减小, 将扰动后的过渡过程缩减到 0.5 s。

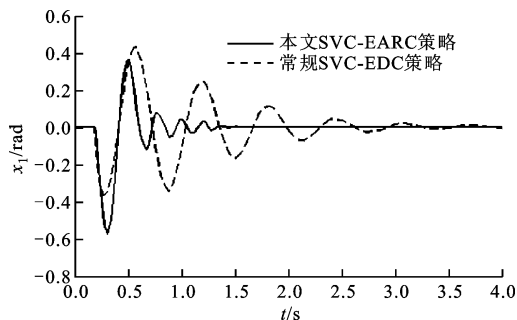


图1 状态变量 x_1 的暂态响应曲线

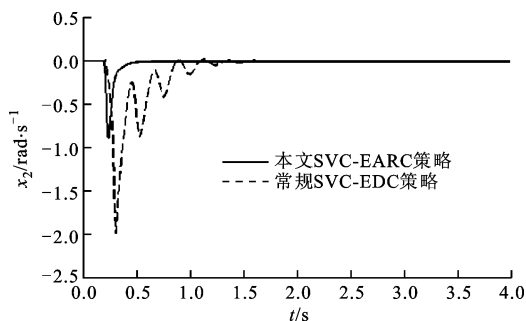


图2 状态变量 x_2 的暂态响应曲线

图3和图4为状态变量 x_3 和 x_4 的暂态响应轨线。 x_3 、 x_4 分别对应于发电机的暂态电势和 SVC 投入系统的等效电纳的响应特性。由图3、图4可见, 在 SVC-EARC 控制方法作用下, x_3 和 x_4 的暂态轨线可以比 SVC-EDC 方法更快地收敛于故障前的稳定运行状态, 分别将过渡过程时间缩短了 1.5 s 和 2 s 左右, 且振荡幅值最高只有 SVC-EDC 方法的 90% 左右。

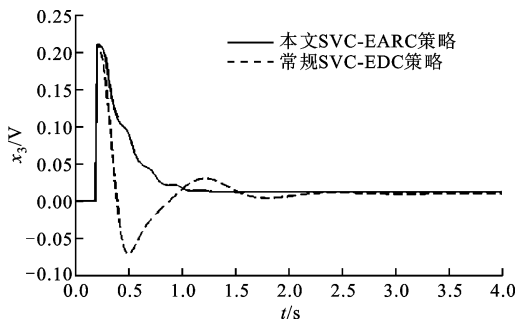


图3 状态变量 x_3 的暂态响应曲线

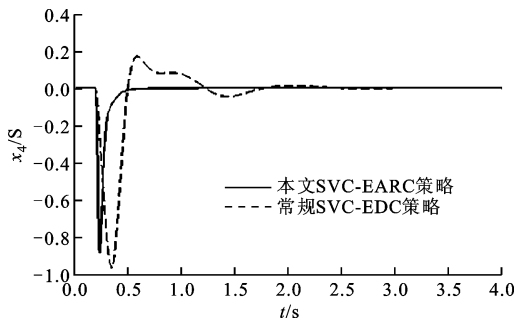


图4 状态变量 x_4 的暂态响应曲线

上述仿真结果也证明了在故障后状态变量是一致有界的, 也验证了本文所提控制策略可以改善发电机功角、暂态电势和 SVC 等效电纳的暂态响应性能, 从而提高系统的暂态稳定性。

图5为 SVC-EARC 控制作用下不确定参数的估计值响应特性。由图5可见, 估计值只需 1 s 左右就可以迅速收敛到稳态值 -0.17 左右, 与文中所设真值基本一致, 所设计的自适应律能有效辨识不确定参数。

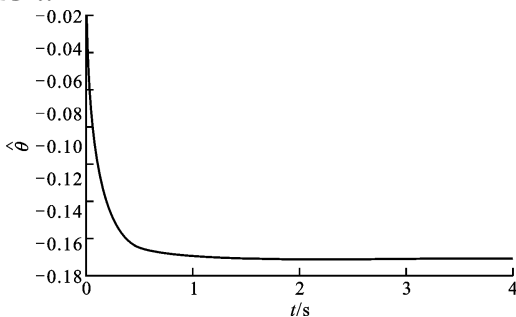


图5 自适应律辨识不确定参数响应曲线

4 结 论

本文提出了一种 SVC 与发电机励磁的自适应鲁棒协调控制方法。针对系统模型的不确定性和遭受的未知扰动,利用自适应逆推算法来设计系统励磁控制律和 SVC 控制律,并结合 L_2 增益控制方法来抑制扰动,从而提高输电系统的暂态稳定性。系统仿真结果表明,本文所设计的自适应鲁棒协调控制策略与常规分开控制方法相比,在故障发生后的过渡过程中,状态变量能保证一致有界,收敛速度快,振荡幅值小,对于扰动具有较强的鲁棒性,且能有效地识别不确定参数。因此,有效提高了系统的暂态稳定性。

参考文献:

- [1] 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,2008:404-428.
- [2] WIBOWO R S, YORINO N, EGHBAI M. FACTS devices allocation with control coordination considering congestion relief and voltage stability [J]. IEEE Transactions on Power System, 2011, 26(4): 2302-2310.
- [3] 王颖博,宁改娣,王跃. 分布式静止同步串联补偿器抑制次同步谐振机理研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(8): 102-107.
WANG Yingbo, NING Gaidi, WANG Yue. Mechanism of damping sub-synchronous resonance with distributed static synchronous series compensator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(8): 102-107.
- [4] SUN Liying, TONG Shaocheng, LIU Yi. Adaptive backstepping sliding mode H-infinity control of static var compensator [J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2011, 19(5): 1179-1185.
- [5] SINGH R, SINGH A K. Transient stability improvement of a FSIG based grid connected wind farm with the help of a SVC and a STATCOM: a comparison [J]. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2012, 4(1): 55-60.
- [6] ROBAK S. Robust SVC controller design and analysis for uncertain power systems [J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(11): 1280-1290.
- [7] MONDAL D, CHAKRABARTI A, SENGUPTA A. Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1): 334-340.
- [8] 辛焕海. 参数不确定性和饱和非线性对电力系统稳定影响的研究 [D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [9] MAHRAN A R, HOGG B W, ELSAYED M L. Coordinated control of synchronous generator excitation and static var compensator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1992, 7(4): 615-621.
- [10] 何斌,张秀彬,赵兴勇. 多机系统中励磁与 SVC 的协调控制 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 152-159.
HE Bin, ZHANG Xiubin, ZHAO Xingyong. Coordinated control of excitation and SVC in multi-machine power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12): 152-159.
- [11] RUAN Yingqin, WANG Jie. The coordinated control of SVC and excitation of generators in power systems with nonlinear loads [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(8): 550-555.
- [12] HARIKRISHNA D, DHEKEKAR R S, SRIKANTH V. A novel approach to dynamic stability enhancement using PID damped fuzzy susceptance controlled SVC [C] // Proceedings of 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [13] WANG Youyi, TAN Y K, GUO Guoxiao. Robust nonlinear coordinated generator excitation and SVC control for power systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2000, 22(3): 187-195.
- [14] 丁青青,刘艳红,汤洪海. 发电机和静止无功补偿器鲁棒非线性协调控制 [J]. 控制与决策, 2013, 28(7): 1099-1102.
DING Qingqing, LIU Yanhong, TANG Honghai. Coordinated robust nonlinear control of synchronous generator and static var compensator [J]. Control and Decision, 2013, 28(7): 1099-1102.
- [15] 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.
- [16] CONG L, WANG Y, HILL D J. Transient stability and voltage regulation enhancement via coordinated control of generator excitation and SVC [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(2): 121-130.
- [17] MIROSLAV K, PETAR V K. Control Lyapunov functions for adaptive nonlinear stabilization [J]. Systems & Control Letters, 1995, 26(1): 17-24.

(编辑 刘杨)