

考虑模型不确定性和时延的静止无功补偿器自适应滑膜控制器设计

王曦 王渝红 李兴源 苗淼

**Design of the static var compensator adaptive sliding mode controller considering model uncertainty and time-delay**

Wang Xi Wang Yu-Hong Li Xing-Yuan Miao Miao

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica 63, 238407 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.238407

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238407>

当期内容 View Table of Contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于多尺度熵的电力能量流复杂性分析](#)

苟竞, 刘俊勇, 魏震波, Gareth Taylor, 刘友波

2014, 63(20): 208402. 全文: [PDF](#) (359KB)

["荧光-1"实验装置物理设计](#)

孙奇志, 方东凡, 刘伟, 秦卫东, 贾月松, 赵小明, 韩文辉

2013, 62(7): 078407. 全文: [PDF](#) (1934KB)

# 考虑模型不确定性和时延的静止无功补偿器 自适应滑膜控制器设计\*

王曦 王渝红<sup>†</sup> 李兴源 苗淼

(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

(2014年5月28日收到; 2014年7月29日收到修改稿)

静止无功补偿器 (static var compensator, SVC) 不仅可以为电力系统提供无功支撑、稳定电压, 其附加控制还可以有效提高系统暂态稳定性, 但 SVC 模型参数的不确定性以及广域测量信号时延等外部干扰给附加控制器的设计带来很大的难度. 提出了一种基于自适应滑模变结构理论的 SVC 鲁棒控制器设计方法, 所设计控制器能有效提高系统暂态稳定性, 并且其对于模型不确定性以及时延有较好的鲁棒性. 首先根据区域惯量中心的运动方程建立了包含 SVC 的电力系统模型; 然后将滑模变结构理论应用于电力系统模型中, 求得 SVC 附加控制律, 并通过自适应律优化控制器参数; 最后通过四机两区域系统以及 IEEE9 节点系统对 SVC 控制器效果进行了仿真实验. 结果表明, SVC 自适应滑模控制器可以有效提升系统暂态稳定性, 并且其性能优于传统的线性控制方法.

**关键词:** 暂态稳定性, 滑模控制, 参数自适应, 时延

**PACS:** 84.70.+p, 84.71.-b

**DOI:** 10.7498/aps.63.238407

## 1 引言

随着我国电网规模的逐步扩大, 区域互联、远距离输电、交直流并联运行等都给电力系统的安全稳定运行带来很大的挑战. 灵活交流输电系统 (flexible AC transmission systems, FACTS) 是一种能够改变电力系统某特定点的电压、相角和阻抗的新的装置, 其具有快速响应的优良特性. FACTS 设备的应用给电力系统增加了极其强有力的控制手段<sup>[1-4]</sup>. 静止无功补偿器 (static var compensator, SVC) 是一种并联型 FACTS 装置, 已被广泛应用于电力系统以提供无功支撑和提高动态电压稳定性, 同时利用 SVC 的附加控制功能, 还可以进一步提高电力系统的暂态稳定性<sup>[5,6]</sup>.

常规的 SVC 控制器一般是基于系统在平衡点处的局部线性化模型设计的, 当系统受参数变化、

网络扰动等不确定因素影响时, 系统实际运行点可能远离设计运行点, 控制效果将受到减弱和限制. 文献<sup>[7, 8]</sup>采用反馈线性化方法设计了 SVC 控制器, 该方法通过引入状态反馈量消去复杂电力系统的非线性, 然后运用变分理论求解二次型性能指标的最优解得到控制规律, 其缺点在于要求模型精确、参数已知, 在处理模型参数不准确或者外界干扰时略显不足. 文献<sup>[9]</sup>基于自适应逆推方法设计了含有 SVC 的单机无穷大系统的控制律, 对 SVC 建模时将其简化为一阶惯性环节, 并将一阶惯性环节中的时间常数看成一个确定的已知量, 而未考虑时间常数的不确定性. 实际上 SVC 一阶模型中时间常数是关于触发角的高阶函数, 所以它是一个随着系统状态量变化的有界量<sup>[10,11]</sup>; 另一方面, 随着广域测量系统的发展, 控制器中采用广域优选信号成为可能, 但广域信号的时延问题会对控制器的设

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 51037003)、国家电网公司大电网规划与运行控制技术重大专项 (批准号: SGCC-MPLG027-2012) 和国家电网公司科技项目 (批准号: 522830140003) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: yuhongwang@scu.edu.cn

计造成一定的困难.

在众多鲁棒控制方法中,滑模变结构控制实现简单,且其对满足匹配条件的外界干扰、模型的不确定性和未建模动态具有不变性(亦称作完全鲁棒性)<sup>[12-17]</sup>.本文采用自适应滑模变结构理论设计了SVC非线性鲁棒控制器,用于提高电力系统的暂态稳定性,所设计的控制器对于SVC等效时间常数不确定性以及时延等外界干扰具有鲁棒性.首先建立了包含SVC的多机系统数学模型,模型考虑了SVC模型不确定性及时延的干扰;然后基于自适应滑模控制理论设计了SVC附加控制器,控制目标为区域间等值惯量中心角速度偏差等于零;最后通过四机两区域系统和IEEE9节点系统对设计的控制规律进行了仿真验证.

## 2 数学模型

### 2.1 惯性中心模型

对于如图1所示的包含SVC的多机系统,将SVC两端系统划分为两个区域,区域1,2中均包含多台发电机.第*i*台发电机转子运动方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_0(\omega_i - 1), \\ \dot{\omega}_i = (P_{mi} - P_{ei})/M_i, \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\delta_i$ ,  $\omega_0$ ,  $\omega_i$ ,  $M_i$ ,  $P_{mi}$  和  $P_{ei}$  分别为第*i*台发电机功角、基准角速度、标幺角速度、惯性时间常数、机械功率和电磁功率.定义区域内惯性中心角速度为<sup>[18]</sup>

$$\omega_e = \sum_{i=1}^N \omega_i M_i / M_e, \quad (2)$$

式中,  $N$  为区域内发电机总数,  $M_e$  为区域内发电机惯量时间常数之和.由(1), (2)式可以得到区域惯性中心模型的运动方程

$$\dot{\omega}_e = (P_{mT} - P_{eT})/M_e, \quad (3)$$

式中,  $P_{mT}$ ,  $P_{eT}$  分别为区域内发电机机械功率总和、电磁功率总和.对于图1所示的系统而言,忽略线路损耗,区域1和区域2电磁功率  $P_{eT1}$ ,  $P_{eT2}$  分别为

$$\begin{cases} P_{eT1} = P_{L1} + P_{ac}, \\ P_{eT2} = P_{L2} - P_{ac}, \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $P_{L1}$ ,  $P_{L2}$  分别为区域1和区域2内的总负荷功率;  $P_{ac}$  为交流联络线功率,

$$P_{ac} = E_1 E_2 \sin \theta / X_{ac}, \quad (5)$$

其中,  $E_1 E_2$  为联络线两端电压,  $\theta$  为联络线端电压相角差,  $X_{ac}$  为交流联络线总电抗,  $X_{ac} = X_1 + X_2 + X_1 X_2 B_{svc}$ ,  $B_{svc}$  为SVC的电纳,  $X_1$ ,  $X_2$  为交流联络线电抗. SVC通常安装于联络线中点位置,此时对系统稳定性提升作用最大<sup>[19,20]</sup>.

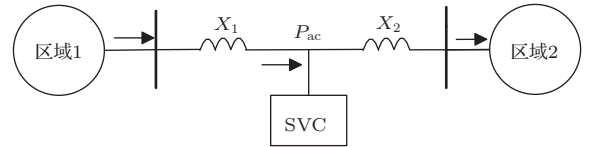


图1 含SVC的两区域系统模型

### 2.2 SVC数学模型

在研究SVC对系统稳定性的影响时,其通常被简化为一阶惯性环节.考虑到实际系统中SVC一阶模型的参数不准确、未考虑高阶未建模动态等因素,本文在对SVC建模时,将时间常数设置为有界的不确定量,同时考虑广域测量信号时延的干扰,以确保所设计控制器的鲁棒性. SVC模型为

$$\begin{aligned} \dot{B}_{svc} &= (-B_{svc} + B_{svc0} + u_{svc})/T_{svc} + d(t), \\ T_{s,\min} &\leq T_{svc} \leq T_{s,\max}, |d(t)| \leq D, \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $B_{svc0}$  为SVC初始电纳;  $u_{svc}$  为SVC控制量;  $T_{svc}$  为不确定的时间常数,其值通常为40—80 ms;  $d(t)$  为时延等外部有界干扰;  $D$  为干扰的界.

## 3 SVC自适应滑模控制器设计

### 3.1 滑模变结构理论

滑模控制系统一般包括趋近模态运动和滑动模态运动两个过程.系统一旦进入滑动模态运动,则对满足匹配条件的内部参数摄动和外部扰动具有“完全自适应性”,因此该方法具有良好的鲁棒性.考虑下面二阶不确定非线性系统的镇定问题:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x) + b(x)u + w, \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $x_1$ ,  $x_2$  为状态变量;  $b(x)$  不确定且有  $b_{\min} \leq b(x) \leq b_{\max}$ ;  $w$  为扰动项,  $|w| \leq W$ . 定义滑模面函数  $s = cx_1 + x_2$ , 正常数  $c$  反映系统到达滑模面后镇

定速度. 设计的滑模控制律由等效控制律  $u_{eq}$  和不连续控制项  $-K\text{sgn}(s)$  构成.

1) 等效控制律用来抵消系统中已知的非线性特性. 假设系统模型精确且无干扰, 令  $\dot{s} = 0$  可求得

$$u_{eq} = \hat{b}^{-1}[-f(x) - cx_2], \quad (8)$$

$\hat{b} = \sqrt{b_{\max}b_{\min}}$ , 为  $b(x)$  的估计值.

2) 不连续控制项用来补偿系统不确定项和扰动, 整个滑模控制律为

$$u = \hat{b}^{-1}[-f(x) - cx_2] - K\text{sgn}(s), \quad (9)$$

$\text{sgn}(s)$  为符号函数. 为保证系统有限时间内到达滑模面, 需使李雅普诺夫函数  $V = s^2/2$  的导数满足  $s\dot{s} \leq -\eta|s|$  ( $\eta$  为正常数), 可以推出

$$K \geq \beta \hat{b}^{-1}(\eta + W) + (\beta - 1)|u_{eq}|,$$

其中  $\beta = \sqrt{b_{\max}/b_{\min}}$ .

### 3.2 参数自适应律

(9) 式中参数  $K$  表征系统抑制干扰的能力.  $K$  越大系统抗干扰的能力越强, 但过大的  $K$  会导致系统抖振加大, 不利于提高控制品质;  $K$  太小将影响系统到达滑模面的速度. 所以如果  $K$  是自适应变动的, 使它总是处在理想值, 则系统的控制性能将得到改善. 本文设计参数  $K$  的自适应律为

$$K = r|s|, \quad (10)$$

式中  $r$  为正的常数. 参数  $K$  随着滑模面函数自适应调整, 系统离滑模面较远时,  $K$  值较大, 以提高到达滑模面的速度; 当系统趋近于滑模的面时,  $K$  值减小, 以抑制抖振.

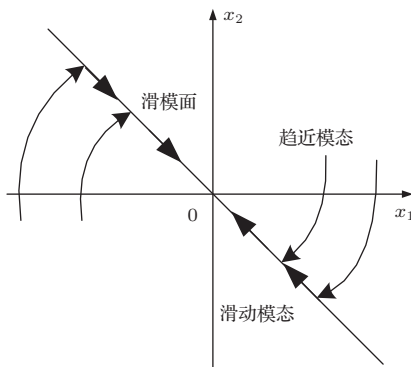


图2 系统运行轨迹

此滑模控制运动过程包括以下两个阶段: 1) 控制律首先驱动系统状态在有限时间内从任意初始位置到达滑模面, 即  $s = 0$ ; 2) 到达滑模面后, 系统沿滑模面滑动到设计稳定点  $x = 0$ . 系统运行轨迹如图 2 所示.

### 3.3 SVC 自适应滑模控制器设计

SVC 的主要功能是提供无功支撑以保证电压稳定, 本文设计 SVC 附加控制器用以提升系统暂态稳定性, 控制目标是使图 1 所示两区域惯性中心角速度偏差为零. 系统状态变量选为两区域惯性中心角速度偏差及其一阶导数:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{e2} - \omega_{e1}, \\ x_2 = \dot{\omega}_{e2} - \dot{\omega}_{e1} \\ \quad = \frac{P_{mT2} - P_{eT2}}{M_{e2}} - \frac{P_{mT1} - P_{eT1}}{M_{e1}}. \end{cases} \quad (11)$$

通常情况下原动机输出机械功率变化速率相对于 SVC 响应速度较慢, 因此可以假设  $\dot{P}_{mT} = 0$ . 另外, 控制器设计过程中不考虑负荷的动态特性, 则  $\dot{P}_L = 0$ . 根据 (4), (5), (11) 式可将系统状态方程改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{\dot{P}_{ac}}{M_d} \\ \quad = \frac{1}{M_d X_{ac}^2} \left\{ \dot{\zeta} X_{ac} - \zeta X_1 X_2 [(-B_{svc} + B_{svc0} + u_{svc})/T_{svc} + d(t)] \right\}, \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $M_d = M_{e1}M_{e2}/(M_{e1} + M_{e2})$ ,  $\zeta = E_1E_2 \sin \theta$ . 模型中包含不确定参数  $T_{svc}$  以及时延等外部干扰  $d(t)$ .

根据 3.1 节滑模变结构理论设计 SVC 鲁棒控制器, 依然选择传统线性滑模面函数  $s = c_1x_1 + x_2$ . 首先求取等效控制律, 不确定量  $T_{svc}$  采用其参数估计  $T'_{svc}$  代替.

$$T'_{svc} = \sqrt{T_{s,\max}T_{s,\min}}. \quad (13)$$

不考虑外界干扰  $d(t)$ , 可推导出等效控制律

$$\begin{aligned} u_{eq1} &= B_{svc} - B_{svc0} \\ &+ T'_{svc} \frac{(M_d X_{ac}^2 c_1 x_2 + \dot{\zeta} X_{ac})}{(\zeta X_1 X_2)}. \end{aligned} \quad (14)$$

用不连续控制项  $-k\text{sgn}(s)$  补偿系统 SVC 模型不确定时间常数及时延扰动, 等效控制和不连续控

制共同构成 SVC 鲁棒控制律

$$u_{svc} = u_{eq1} - k \operatorname{sgn}(s). \quad (15)$$

根据 3.1 节滑模变结构理论, 为保证系统有限时间内到达滑模面, 系数  $k$  需满足

$$k \geq T'_{svc} T_1 D - \frac{T'_{svc} X_{ac}^2 M_d T_1 \eta_1}{\varsigma X_1 X_2} + (T_1 - 1) |u_{eq1}|, \quad (16)$$

式中,  $T_1 = \sqrt{T_{s,max}/T_{s,min}}$ ,  $\eta_1$  为正常数. 在 (16) 式的基础上, 根据 3.2 节参数自适应律可取

$$k = r_1 |s|, \quad (17)$$

式中  $r_1$  为正的常数. (16) 式保证了滑模面函数  $s$  的渐近稳定, 系统将在有限时间内到达滑模面  $s = 0$ . 到达滑模面后, 求解微分方程  $s = c_1 x_1 + \dot{x}_1 = 0$  可知系统最终将在  $x_1 = 0$  处稳定运行, 控制目标得到实现. 控制律推导过程中, 未进行线性化处理, 且考虑了模型参数不确定性以及时延干扰, 因此, 所设计的 SVC 控制器具有很强的鲁棒性. 此外, 由于采用基于惯性中心角速度等广域测量信号, 本文所设计的控制器不仅可以提高局部系统暂态稳定性, 对于区域间低频振荡等广域阻尼问题也有很好的效果. 包含附加控制器的 SVC 整体控制结构图如图 3 所示.  $V$ ,  $V_{ref}$  分别为 SVC 安装点实际电压和参考电压;  $\alpha$  为 SVC 触发角,  $\alpha_{max}$ ,  $\alpha_{min}$  分别为触发角上下限.

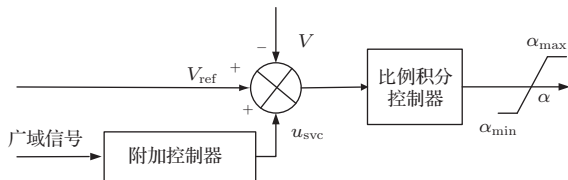


图 3 SVC 控制器结构图

## 4 仿真实验

为验证所提 SVC 自适应滑模控制器对系统暂态稳定性的提升作用, 本文利用电磁仿真软件 P-SCAD 分别搭建四机两区域系统模型和 IEEE9 节点系统模型, 利用传统 SVC 附加控制律同本文设计的 SVC 控制律作对比进行仿真实验.

### 4.1 四机两区域模型

#### 4.1.1 故障仿真分析

四机两区域系统单线图如图 4 所示, 发电机均采用详细的 6 阶模型, 励磁采用静态励磁模型.

SVC 容量为 50 MVar, 安装于母线 8.  $P_{L7}$ ,  $P_{L9}$  分别为母线 7 和母线 9 上所带负荷;  $C_7$ ,  $C_9$  分别为母线 7 和母线 9 上所接无功补偿装置.

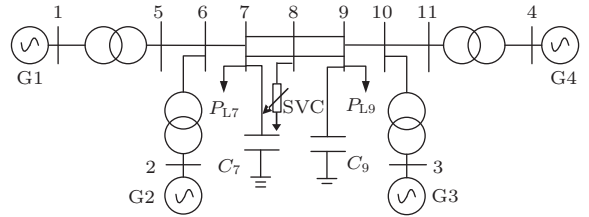


图 4 四机两区域系统单线图

根据本文方法设计图 4 所示系统的 SVC 附加控制器时, 令发电机 G1, G2 为区域 1, G3, G4 为区域 2, 控制目标为两区域惯性中心角速度偏差为零. 为验证所设计的 SVC 控制器效果, 本文以传统线性控制理论设计的 SVC 控制器作为对比进行仿真分析. 传统 SVC 附加控制器输入信号采用联络线功率信号, 传递函数

$$G(s) = 0.3 \frac{10s}{1 + 10s} \left( \frac{1 + 0.5s}{1 + 0.025s} \right)^2.$$

仿真设置为: 5 s 时线路 7-8 单回线路发生三相短路接地故障, 故障持续时间为 0.1 s. 仿真结果如图 5 所示.

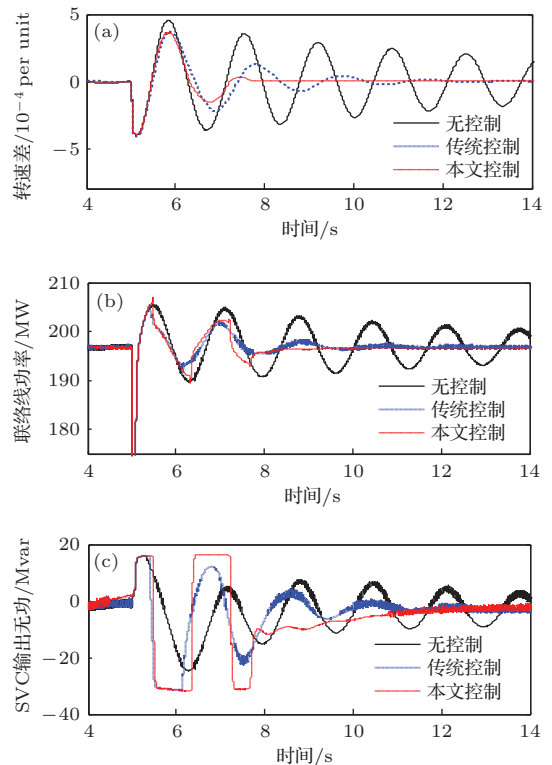


图 5 (网刊彩色) 时域仿真曲线 (a) 惯性中心角速度差; (b) 联络线 8-9 单回线有功功率; (c) SVC 输出无功功率

从图5(a), (b)可以看出: SVC无附加控制时,故障后惯性中心转速差以及联络线有功功率呈弱阻尼振荡,系统稳定性较差;SVC使用传统控制和本文控制时,振荡均可以被有效抑制,系统稳定性得到提升,其中本文设计滑模控制器从故障开始到达稳定运行点仅需3 s,优于传统控制策略.图5(c)中无功功率直接反映SVC输出控制量大小,可以看出,无附加控制时故障后SVC输出无功仅用于稳定交流母线电压,其仍有大量可调容量未被用于提升系统的稳定性中,因而系统暂态稳定性较差.而本文控制方法暂态过程前两个周期SVC均输出最大控制量,因而系统可以被快速驱动到达稳定平衡点.

为了进一步分析滑模控制器的特性,图6给出了故障后SVC滑模控制器输出信号及状态变量的相平面图.故障后系统首先处于趋近模态,控制器输出附加控制量驱动系统朝滑模面运动.到达A点时,滑模面函数 $s$ 符号改变,控制器输出进行切换,以驱动系统沿设计好的滑模面运动.到达B点后,控制器输出到达最小限值,系统无法维持沿AB运动,再次进入趋近模态.经过反复几次控制的切换后,系统逐渐运行到稳定点.从理论上讲滑模控制属于不连续控制,对于机械设备而言,控制信号频繁切换可能导致设备的磨损,而对于SVC、高压直流输电系统等使用电力电子器件的设备,控制信号的切换只是推迟或者提前电力电子器件的触发时间,在实际应用中是可行的.

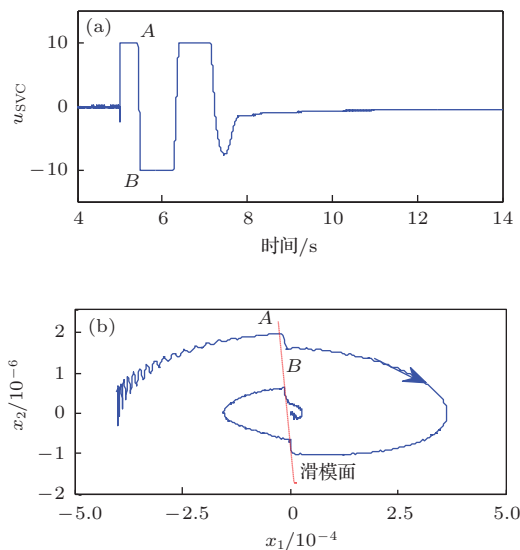


图6 SVC滑模控制器输出及状态变量轨迹 (a)滑模控制器输出; (b)状态变量相平面轨迹

为了更清晰地表明本文设计的控制器的有效性,在不同SVC控制策略情况下对系统进行模式分析,结果如表1所列示.

表1 主振模式表

控制策略	振荡模式/Hz	阻尼比
无控制	0.53	0.06
传统控制	0.50	0.12
本文控制	0.52	0.23

从故障仿真及模式分析可以看出,本文所提SVC自适应滑模控制策略可以有效提高系统的暂态稳定性,其性能优于传统的线性控制器.由于采用广域信号,滑模控制器对于区域间低频振荡能够起到很好的抑制作用,因此,其在大型电力系统中具有很好的应用前景.

#### 4.1.2 时延对自适应滑模控制器的影响

本文所设计的SVC控制器中包含惯性中心角速度、联络线功率、电压等广域信号,因此需考察广域信号时延对于控制器效果的影响.本文控制器设计过程中将时延作为有界干扰处理,为了体现SVC控制器对于时延的鲁棒性,分别对以下三种情况进行仿真验证:

- 1) 所有信号无时延;
- 2) 所有广域信号时延 50 ms;
- 3) 所有广域信号时延 100 ms.

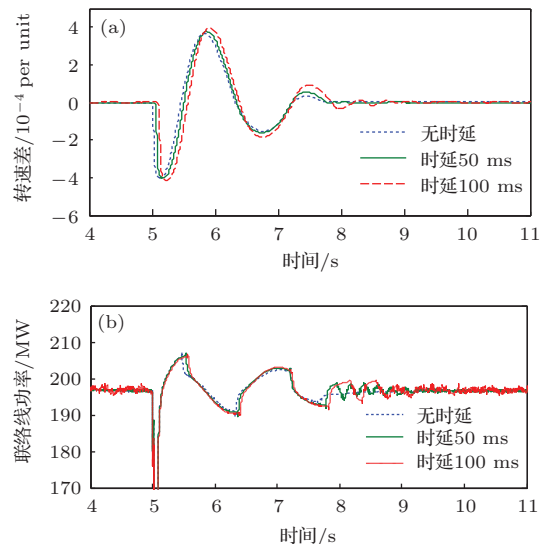


图7 (网刊彩色)不同时延下的仿真曲线 (a)惯性中心角速度差; (b)联络线7-9有功功率

故障设置不变,仿真结果如图7所示.从图7可以看出,三种情况下惯性中心角速度和联

络线功率均可以在故障后5s内稳定,表明本文设计的SVC控制器对于时延具有较好的鲁棒性.但从图7(b)所示的联络线功率响应曲线可以看出,自8s开始,随着时延的增大,系统出现不同程度的高频振荡.其原因在于本文控制器设计过程中将时延作为有界干扰处理,由(16)式可知,随着时延的增大,参数 $k$ 需要相应增大以保证滑模面在有限时间可达,这会引入系统发生一定程度的高频振荡.从图7还可以看出,该振荡很快平息,不会对系统造成大的影响.

### 4.2 IEEE9节点系统

为进一步验证本文设计的滑模控制器的效果,使用IEEE9节点系统为算例继续进行仿真验证,系统单线图如图8所示, $T_1, T_2, T_3$ 为变压器; $P_{L1}, P_{L2}, P_{L3}$ 为负荷,各线路、元件详细参数见文献[21].文献[22]通过稳定性边界理论得到IEEE9节点系统中线路5-7故障对系统暂态稳定性影响最大,因此本文选择在母线5上配置SVC,容量为50MVar.此外,根据文献[23]对于图8所示系统的模式分析,发电机G1与G2, G3间的模式为系统主导模式,因此,SVC附加控制器设计过程中,选择发电机G1与G2, G3惯性中心角速度偏差作为控制目标.仍然采用传统超前滞后校正控制器作为对比,验证本文设计SVC的控制效果.

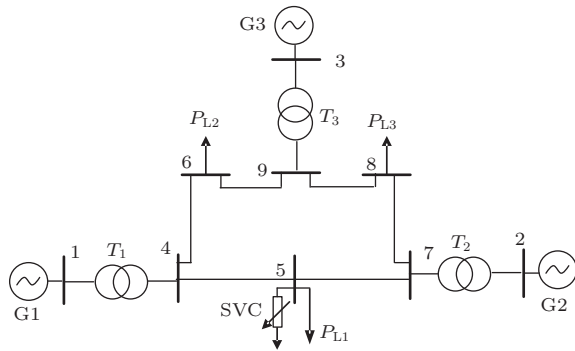


图8 IEEE9节点系统单线图

3s时,交流线路6-9发生3相短路故障,故障持续时间为0.1s.取线路4-5和线路4-6有功功率作为观测量.仿真结果如图9所示.从图9可以看出,使用本文设计的SVC滑模控制器时,两条交流线路功率均可以在故障后2s内抑制振荡,效果优于传统SVC控制器.

进一步对不同地点故障控制器的效果进行验证.3s时,交流线路8-9间发生三相短路故障,持续时间为0.1s.依然选择线路4-5和线路4-6有功功率作为观测量,仿真结果如图10所示.从图10可以看出,故障地点的变化对本文设计的控制器的效果影响不大,控制器仍能有效抑制振荡,使系统快速恢复到稳定运行状态.这说明对于不同地点的故障,本文设计的SVC控制器具有较强的鲁棒性,其对系统暂态稳定性的提升效果明显优于传统控制器.

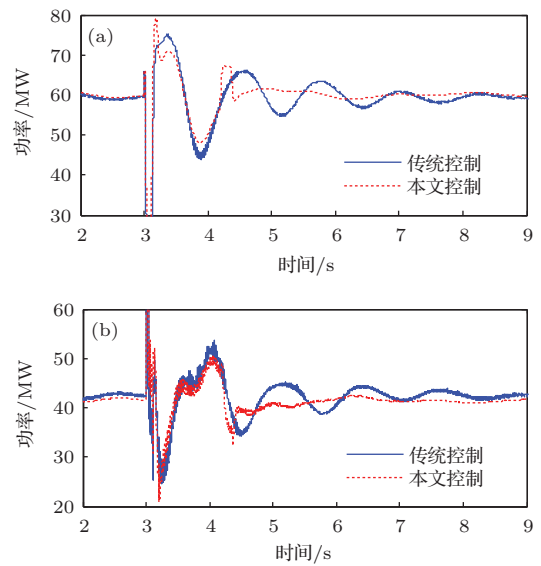


图9 (网刊彩色) 线路6-9短路故障仿真曲线 (a) 线路4-5有功功率; (b) 线路4-6有功功率

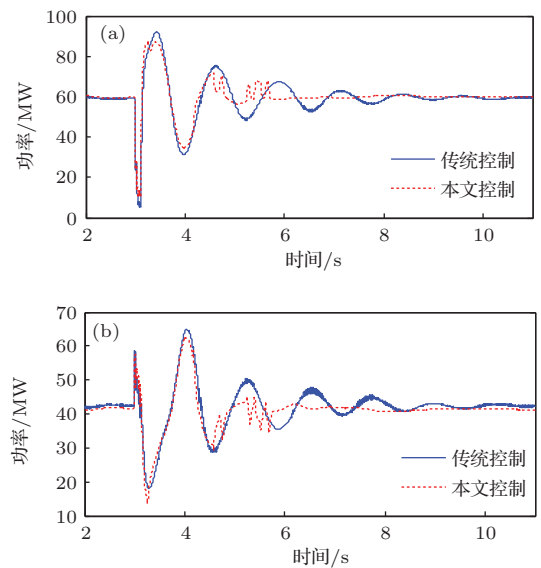


图10 (网刊彩色) 线路8-9短路故障仿真曲线 (a) 线路4-5有功功率; (b) 线路4-6有功功率

## 5 结 论

本文基于自适应滑模变结构理论设计了 SVC 鲁棒控制器, 可以有效提高系统的暂态稳定性, 并且所设计的控制器对模型不确定性及不同故障具有较强的鲁棒性. 在电力系统模型建立过程中, 由于采用惯性中心模型, 因此本文设计的 SVC 控制器并不局限于在小系统中使用, 其在实际电力系统中

中具有很好的应用前景. 控制器设计过程中未经过线性化, 较好地保持了模型的物理结构及其特性, 因此暂态过程中控制效果比传统线性方法好. 本文中时将时延作为外部干扰处理, 所设计的控制器对于时延有一定的鲁棒性, 但不能完全消除其影响. 若直接使用时滞系统滑模理论设计控制器, 则可以进一步提升控制器对于时延的鲁棒性, 这将是下一步研究工作的重点.

## 参考文献

- [1] Wang Z H, Shen F, Wu T Z 2000 *Auto. Elect. Power Syst.* **24** 1 (in Chinese) [王仲鸿, 沈斐, 吴铁铮 2000 电力系统自动化 **24** 1]
- [2] Zhang X P, Rehtanz C, Pal B 2006 *Flexible AC Transmission Systems: Modeling and Control* (Berlin: Springer Verlag) pp2–7
- [3] Li S P, Liu G Y 2006 *Static Reactive Power Compensation Technology* (Beijing: China Electric Power Press) pp22–30 (in Chinese) [栗时平, 刘桂英 2006 静止无功功率补偿技术 (北京: 中国电力出版社) 第 22—30 页]
- [4] Jiang Q Y, Zhang P X, Cao Y J 2006 *Proc. CSEE* **26** 82 (in Chinese) [江全元, 张鹏翔, 曹一家 2006 中国电机工程学报 **26** 82]
- [5] Liu J, Li X Y, Tang G F 2008 *Proc. CSEE* **28** 12 (in Chinese) [刘隽, 李兴源, 汤广福 2008 中国电机工程学报 **28** 12]
- [6] Chang Y, Xu Z 2006 *Trans. China Electrotech. Soc.* **21** 40 (in Chinese) [常勇, 徐政 2006 电工技术学报 **21** 40]
- [7] Ma Y J, Zhou X S 2003 *Proce. CSEE* **23** 84 (in Chinese) [马幼捷, 周雪松 2003 中国电机工程学报 **23** 84]
- [8] Wang Y, Chen H, Zhou R 2000 *Int. J. Electr. Power Energy Sys.* **22** 463
- [9] Fu J, Zhao J, Dimirovsk G M 2006 *Proc. CSEE* **26** 7 (in Chinese) [付俊, 赵军, 乔治·迪米罗夫斯基 2006 中国电机工程学报 **26** 7]
- [10] Hingorani N G, Gyugyi L 2000 *Understanding FACTS-Concept and Technology of Flexible AC Transmission Systems* (Piscataway: IEEE Press) pp68–69
- [11] Tan X, Tong L, Yin Z 1998 *International Conference on Power System Technology* Beijing, China, 1998 p672
- [12] Itkis U 1976 *Control Systems of Variable Structure* (New York: Wiley) pp32–40
- [13] Huang L L, Qi X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 080507 (in Chinese) [黄丽莲, 齐雪 2013 物理学报 **62** 080507]
- [14] Qi D L, Wang Q, Yang J 2011 *Chin. Phys. B* **20** 100505
- [15] Kong C C, Chen S H 2009 *Chin. Phys. B* **18** 91
- [16] Lou X Y, Cui B T 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4434
- [17] Hung J Y, Gao W, Hung J C 1993 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **40** 2
- [18] Ni Y X, Chen S S, Zhang B L 2002 *Dynamic Power System Theory and Analysis* (Beijing: Tsinghua University Press) pp188–190 (in Chinese) [倪以信, 陈寿孙, 张宝霖 2002 动态电力系统的理论和分析 (北京: 清华大学出版社) 第 188—190 页]
- [19] Farsangi M M, Hossein N, Song Y H 2007 *IEEE Trans. Power Syst.* **22** 1061
- [20] Liu X L, Wang X 2007 *J. Zhengzhou Univ. (Eng. Sci.)* **28** 87 (in Chinese) [刘宪林, 王鑫 2007 郑州大学学报 (工学版) **28** 87]
- [21] Anderson P M, Fouad A A 1977 *Power System Control and Stability* (Ames: the Iowa State University Press) pp152–158
- [22] Xue A C, Shen C, Mei S W 2006 *Auto. Electr. Power Syst.* **30** 1 (in Chinese) [薛安成, 沈沉, 梅生伟 2006 电力系统自动化 **30** 1]
- [23] Pan X P 2008 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [潘学萍 2008 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]



# Design of the static var compensator adaptive sliding mode controller considering model uncertainty and time-delay\*

Wang Xi Wang Yu-Hong<sup>†</sup> Li Xing-Yuan Miao Miao

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

( Received 28 May 2014; revised manuscript received 29 July 2014 )

## Abstract

Using supplementary controller of static var compensator (SVC) is an effective way for enhancing the transient stability of an interconnected power system. In conventional controller design, SVC is usually considered as a first-order inertial model with known parameters. In this paper, a nonlinear controller design method based on adaptive sliding mode control is proposed to design a SVC supplementary controller. The imprecise of the model and the external disturbances such as time-delay are taking into consideration in the SVC model, and the interconnected system with SVC is considered by the center of inertia model. Then the SVC supplementary controller is designed based on the adaptive sliding control theory to improve the transient stability of the power system. Finally, the effectiveness of the proposed controller is verified using two simple systems. Simulation results show that the designed SVC sliding mode controller is robust to the variation of operation conditions and time-delays, and it has a better performance in enhancing the system stability as compared with the conventional SVC controller.

**Keywords:** transient stability, sliding mode control, parameter adaptive, time-delay

**PACS:** 84.70.+p, 84.71.-b

**DOI:** [10.7498/aps.63.238407](https://doi.org/10.7498/aps.63.238407)

---

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51037003), the State Grid Corporation of China, the Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (Grant No. SGCC-MPLG027-2012), and the Technical Project of State Grid Corporation of China (Grant No. 522830140003).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [yuhongwang@scu.edu.cn](mailto:yuhongwang@scu.edu.cn)